



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ TLUMIČE S
MAGNETOREOLOGICKOU KAPALINOU**

MEASUREMENT OF WEAR IN SHOCK ABSORBER WITH MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Žáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: Jiří Žáček
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Jakub Roupec, Ph.D.
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření opotřebení tlumiče s magnetoreologickou kapalinou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Železná frakce v magnetoreologických kapalinách způsobuje zvýšený otěr (abrazi) v kontaktu, což zvyšuje opotřebení dílů a snižuje životnost tlumiče. V tlumiči lze definovat tyto podstatné kontaktní dvojice: píst x hydraulický válec; těsnění plovoucího pístu x hydraulický válec; těsnění pístonice x pístonice. Aby bylo možné odhadnout životnost tlumiče s magnetoreologickou kapalinou, je nutné zjistit míru opotřebení experimentálně a porovnat s kontaktní dvojicí zaplavenou konvenčním tlumičovým olejem.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je experimentálně analyzovat vliv magnetoreologických kapalin na míru opotřebení hydraulického válce tlumiče pomocí tribometru Bruker UMT Tribolab a profilometru Bruker Contour GT-X8 při testech v konfiguraci Ball-on-Plate.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- studium parametrů a testů popisujících opotřebení materiálu (ASTM G75, Millerovo číslo, atd.),
- příprava vzorků – nerezová ložisková kulička (Ball) a destička z oceli S355J2C+C (Plate),
- nastavení zařízení pro měření s recipročním pohybem v režimu bez odlehčení a s odlehčením na konci lineárního pohybu pro plné zaplavení kontaktu,
- provedení experimentů s kapalinami MRF-122EG, MRF-132DG a MRF-140CG.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

ASTM International. ASTM G 75-07 Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). American Society for Testing and Materials, 2009, 1–9.

SIEGMANN, S., O. BRANDT a M. DVORAK. Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, roč. 13, č. 1, s. 37–43.

WANG, S. H., J. JIANG a M. M. STACK. Methodology Development for Investigation of Slurry Abrasion Corrosion by Integrating an Electrochemical Cell to a Miller Tester. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, 2015, roč. 1, č. 2, s. 1–9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá studiem měření abrazivity magnetoreologických kapalin a jejich působení na tlumič kmitání. Dle současného poznání se abrazivita magnetoreologických kapalin měří mnoha způsoby. Pro tento test byla zvolena metoda pin on block, kdy se pin recipročně pohyboval po destičce z referenčního materiálu v lázni z magnetoreologické kapaliny. Výsledky ukázaly, že životnost magnetoreologického tlumiče oproti klasickému tlumiči je přibližně 4x menší. Tato skutečnost může pomoci při konstrukci magnetoreologických tlumičů či vývoji nových magnetoreologických kapalin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, tlumič, abraze, opotřebení

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with measurement of abrasivity of magnetorheological fluids and its effect on hydraulic shock absorber. The abrasion could be measured and evaluated by many ways. The pin on block measurement method has been selected for this test. The pin was moving on a steel block while the whole system was surrounded by magnetorheological fluid. According to results, the lifetime of magnetorheological shock absorber is 4 times shorter than classical damper. Results of this thesis could be helpful in damper construction or in development of new magnetorheological fluids.

KEYWORDS

Magnetorheological fluid, shock absorber, abrasion, wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÁČEK, Jiří. *Měření opotřebení tlumiče s magnetoreologickou kapalinou*. Brno, 2019, 55 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jakubu Roupcevi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce a Ing. Filipu Jenišovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad a pomoc při nastavení parametrů testů.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jakuba Roupce Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Magnetoreologická kapalina	14
2.2	Magnetoreologický efekt	14
2.3	Magnetoreologický tlumič	15
2.4	Odolnost proti opotřebení	15
2.5	Měření opotřebení materiálu	16
2.6	Millerův test	16
2.7	Millerovo číslo	18
2.8	SAR číslo	19
2.9	Abrazivita a tření MR kapaliny v publikované literatuře	19
2.9.1	Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids [10]	19
2.9.2	Wear Characteristics of Magnetorheological Fluid under Boundary Lubrication [11]	20
2.9.3	Research on the Friction and Wear Properties of Magnetorheological Fluids [12]	21
2.9.4	Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid [13]	22
2.9.5	Friction Behavior of Magnetorheological Fluids with Different Material Types and Magnetic Field Strength [14]	24
2.9.6	Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field [15]	25
2.9.7	Tribological performance of a magneto-rheological suspension [16]	27
2.9.8	Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids [17]	28
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
3.1	Cíl práce	30
3.2	Analýza problému	30
4	MATERIÁL A METODY	32
4.1	Materiál	32
4.1.1	Testované MR kapaliny	32
4.1.2	Referenční olej Paramo HM 32	32
4.2	Tribometr Bruker UMT Tribolab	33
4.3	Profilometr Bruker Contour GT-X	34
4.4	Určení metodiky měření	35
4.5	Nastavení parametrů testu	36

4.6	Příprava vzorků a metodika měření	39
4.7	Metodika vyhodnocení	40
5	VÝSLEDKY	42
6	DISKUZE	44
7	ZÁVĚR	46
7.1	Dosažené výsledky	46
7.2	Další postup	46
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	48
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	50
9.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	50
9.2	Zkratky v textu	50
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	51
11	SEZNAM TABULEK	53
12	SEZNAM PŘÍLOH	54

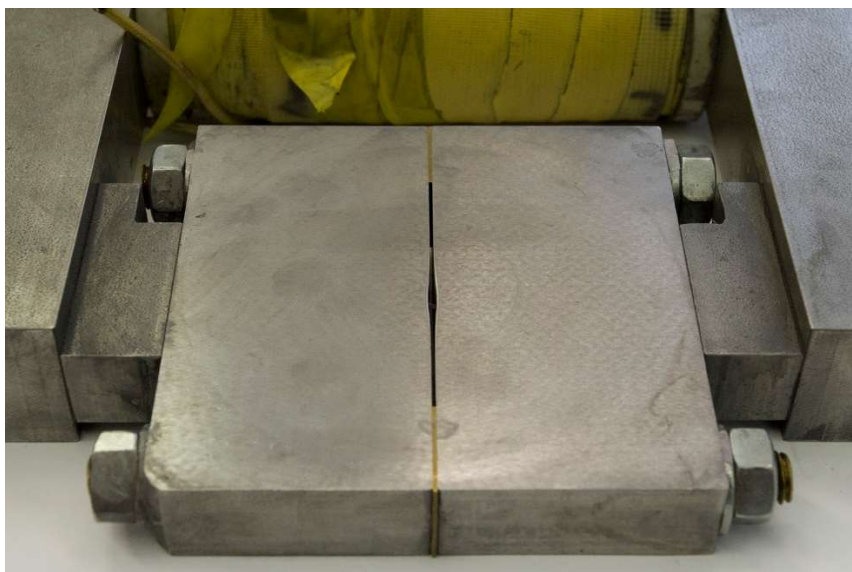
1 ÚVOD

V dnešní době stále méně vyhovují pasivní tlumicí prvky. Ať již z důvodů technických nároků na samotný prvek nebo stroj, kde je používán, či z důvodu zvyšování uživatelské přívětivosti zařízení, ve kterých jsou umístovány. To platí i o kapalinových tlumičích. Proto byly vyvinuty tlumiče, jejichž tlumicí charakteristiky jdou aktivně regulovat. Jedním z těchto druhů jsou i magnetoreologické tlumiče (MR tlumiče). Tyto tlumiče využívají MR kapalin a jejich chování ke změně tlumících charakteristik.

MR kapaliny jsou suspenze, ve kterých je rozptýlená látka tvořená z magneticky měkkých částic o průměru v řádu jednotek mikrometrů, rozptýlená v nosném prostředí, nejčastěji silikonovém oleji nebo vodě. Při průchodu magnetickým polem se částice vlivem magnetických dipólů shlukují a mění fyzikální vlastnosti kapaliny, například zdánlivou viskozitu. V přítomnosti dostatečně silného magnetického pole jsou tyto systémy schopny v řádu milisekund reverzní přeměny z tekutého stavu do gelovitého až tuhého stavu. [1]

Právě částice, jež tvoří v extrémním případě až 85 % hmotnosti suspenze, mohou působit abrazivně na součásti, jimiž MR kapalina proudí. V našem případě MR tlumiče je to patrné především na styku pístu se stěnou tlumiče a taky v průtokových kanálcích. Opotřebení materiálu na těchto místech výrazně zkracuje životnost tlumiče a může činit tlumič s tímto řešením méně konkurenceschopným v porovnání s tlumiči, které používají jiný druh aktivní regulace tlumících charakteristik.

Cílem práce je změření opotřebení materiálu tlumiče při použití různých MR kapalin, jejich vzájemné porovnání a zároveň porovnání s referenčním vzorkem, jenž byl vystaven testu pouze v oleji. Údaje získané tímto testem budou moci být využité k lepší predikci životnosti tlumiče.



Obr. 1-1 Abraze způsobená MR kapalinou

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Magnetoreologická kapalina

Magnetoreologická kapalina je suspenze, složená z nosné kapaliny a v ní rozptýlených magneticky měkkých částic. Hlavní vlastností nosné kapaliny by měla být malá viskozita a vysoký viskozitní index, tzn. nezávislost viskozity na teplotě kapaliny, aby nejlépe vynikl MR efekt. Nosná kapalina bývá nejčastěji voda či různé druhy olejů.

Voda je nejlevnější nosné médium a má dobrý viskozitní index, způsobuje však korozi rozptýlených železných částic a tím výrazně zkracuje životnost MR kapaliny, proto se nejčastěji používají minerální nebo silikonové oleje.

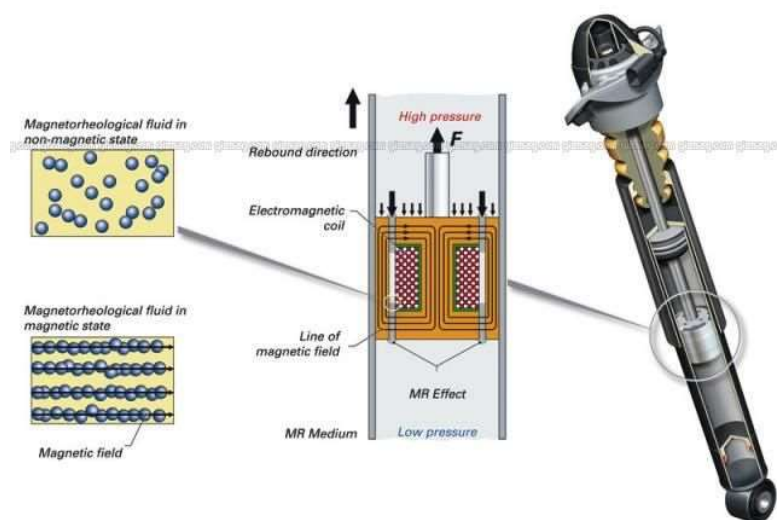
Rozptýlené mikročástice mají obvykle tvar kuliček o velikosti řádově jednotek mikrometrů. Nejpoužívanější jsou částice z kabonylového železa. Vyrábí se také z chemických sloučenin na bázi železa v kombinaci s kobaltem, manganem, mědí, niklem, titanem, uhlíkem a zinkem.

2.2 Magnetoreologický efekt

Při vystavení MR kapaliny magnetickému poli se původně rovnoměrně rozptýlené mikročástice stanou magnetickým dipólem. Takovéto mikročástice se shlukují do řetězců ve směru magnetických siločar. Tento jev se projeví změnou některých fyzikálních vlastností. Nejvýraznější změnou je magnetoviskózní jev. Kapalina vykazuje prudký nárůst relativní viskozity a její velikost bude největší ve směru kolmém na magnetické siločáry a zřetěžené částice. [2]

2.3 Magnetoreologický tlumič

Magnetoreologický tlumič je základní konstrukcí velmi podobný standartnímu jednoplášťovému tlumiči. Celý vnitřní objem tlumiče je vyplněn MR kapalinou. Uvnitř tlumiče se nachází píst, který rozděluje vnitřní objem tlumiče na dvě komory. [3] Tento píst má v sobě průtokové kanálky, skrz které proudí MR kapalina. V pístu se nachází cívka, jež vytváří magnetické pole a tím v kanálcích narůstá zdánlivá viskozita MR kapaliny. Tím je zajištěna regulovatelnost tlumiče. Odezva takového tlumiče na změnu tlumících charakteristik je velmi rychlá. Pohybuje se v řádu milisekund a je tak rychlejší, než jiné druhy semi-aktivních tlumičů. [4]



Obr. 2-1 Princip fungování magnetoreologického tlumiče [5]

2.4 Odolnost proti opotřebení

Opotřebení je porucha součástí, při níž dochází k úbytku materiálu z povrchu součástí způsobené vzájemným pohybem součástí vůči jiné součásti nebo prostředí. Dle ČSN 015050 se rozlišuje 6 základních druhů typů opotřebení. [6]

- Adhezivní
- Abrazivní
- Erozivní
- Kavitační
- Únavové
- Vibrační

Ne všechny druhy opotřebení jsou signifikantně přítomny v procesech uvnitř MR tlumiče. Jedná se hlavně o erozivní a abrazivní opotřebení.

Erozivní opotřebení vzniká dopadem částice obsažené v proudícím médiu na povrch funkční plochy. Pokud má částice dostatečnou energii při dopadu v závislosti na úhlu dopadu, způsobí vytlačení nebo oddělení materiálu z funkční plochy. Nejvyšší intenzita opotřebení vzniká za situace, kdy moduly pružnosti dopadající částice i funkční plochy jsou velké a vzájemně srovnatelné.

Nejvýznamnějším druhem opotřebení v MR tlumiči je abrazivní. Abrazivním opotřebením se nazývá oddělování částic z funkčního povrchu vlivem tvrdosti a drsnosti druhého povrchu, se kterým přijde do kontaktu, nebo vlivem abrazivních částic. Na funkčním povrchu dojde k vydírání materiálu a rýhování.

2.5 Měření opotřebení materiálu

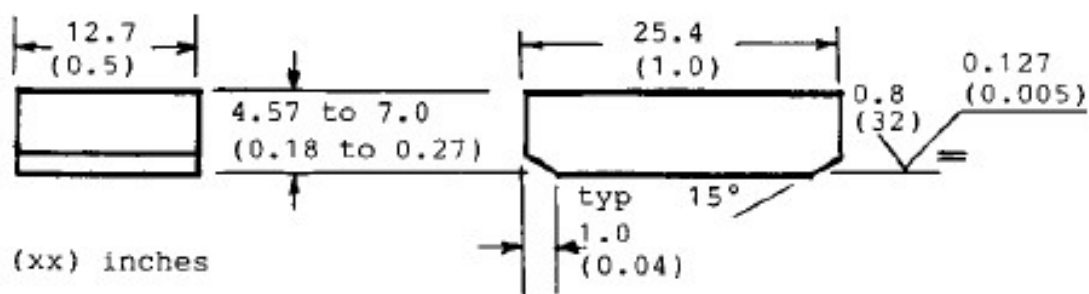
Opotřebení materiálu se měří na tribometru, což je stroj, který simuluje vzájemný pohyb dvou vzorků z rozdílných materiálů a umožňuje měřit tribologické vlastnosti zkoušeného materiálu. Samotné opotřebení může být specifikováno buď úbytkem hmotnosti testovaného materiálu, potažmo ztrátou objemu tělesa, anebo může být měřena geometrie vrypů, a to především jejich hloubka.

Pro měření se používají různé konfigurace vzájemného pohybu:

- Tření testovací kuličky po rotujícím testovaném disku
- Tření testovací kuličky po lineárně pohybujícím se vzorku
- Tření testovací kuličky po dalších 3 testovaných kuličkách rotujících kolem testovací kuličky
- Tření testovacího bloku po boku rotujícího vzorku kruhového tvaru
- Tření čela testovacího po čele testovaném disku

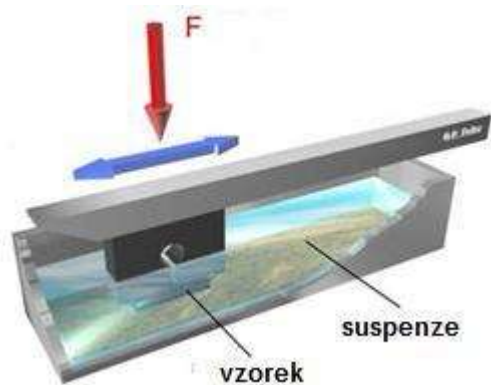
2.6 Millerův test

Millerův test je definován normou ASTM G75 a je to metoda pro určení abrazivity suspenze a odolnosti materiálu proti opotřebení ve zvolené suspenzi. [7] K určení Millerova čísla jakožto ukazatele relativní abrazivity suspenze se užívá standardního referenčního materiálu, který v různých suspenzích vykáže různé hmotnostní úbytky. SAR číslo představuje poměr opotřebení zkoumaného materiálu vůči materiálu referenčnímu. Referenční materiál je ocel Cr27, která má složení: 2,5 % C, 1 % Mn, 0,6% Si, 0,25 % Ni, 28 % Cr, 0,3 % Mo a 0,8 % V.



Obr. 2-2 Rozměry testovací destičky pro Millerův test [7]

Metoda je založena na recipročním pohybu testovací destičky (Obr. 2-2) z referenčního materiálu, která je ponořena ve zkoumané suspenzi. Destička je přitlačena silou 22,24 N k neoprenovému podkladu, po němž se cyklicky pohybuje po dráze 203,2 mm s frekvencí 48 cyklů za minutu (Obr. 2-3). Dnes se většinou používá zkrácený test, který trvá celkově 6 hodin, ale po každých 2 hodinách se testování pozastaví a zkoušená destička se proměří.



Obr. 2-3 Millerův test [8]



Obr. 2-4 Testovací stroj Falex [9]

Po vytáhnutí ze suspenze se destička opláchne pod vodou, vysuší a nechá se na pět minut ležet v isopropylalkoholu, znova osuší a nechá se nahřívat pod lampou po dobu 5 minut. Poté se destička zváží a určí se hmotnostní úbytek způsobený testem.

2.7 Millerovo číslo

Výsledky testu se zanesou do tabulky a určí se funkce závislosti kumulovaného úbytku materiálu M na čase ve formě:

$$M = At^B \quad (1)$$

kde A a B jsou konstanty získané optimalizací této funkce pomocí metody nejmenších čtverců.

Rychlost úbytku materiálu dM se určí z rovnice 1 a to její derivací:

$$dM = BA t^{B-1} \quad (2)$$

Millerovo číslo se poté vypočte pomocí vztahu

$$MN = C * dM \quad (3)$$

kde C je konstanta vztažena k referenčnímu materiálu, která symbolizuje velikost opotřebení testovacího materiálu v referenční abrazivní směsi a je zvolena tak, aby Millerovo číslo bylo bezrozměrné. To znamená, že se jedná o převrácenou hodnotu rychlosti úbytku materiálu (dM).

$$C = 18,18 \text{ mg/h}$$

Zkušenosti ukazují, že suspenze s Millerovým číslem menším než 50, mohou být používány bez zvláštního přihlédnutí k jejím abrazivním vlastnostem. Případě, že Millerovo číslo je vyšší než 50, systém se už musí speciálně navrhnout s ohledem na abrazivní chování suspenze. [7]

2.8 SAR číslo

SAR číslo definuje odolnost materiálu vůči abrazivnímu opotřebení suspenze. Toto číslo je odvozeno od Millerova čísla.

$$SAR = MN * \frac{\rho_{spec}}{\rho_{test}} \quad (4)$$

Kde ρ_{spec} je hustota referenčního materiálu a ρ_{test} hustota materiálu testovaného.

2.9 Abrazivita a tření MR kapaliny v publikované literatuře

2.9.1 Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids [10]

Tato práce pochází přímo od jednoho výrobce MR kapalin – LORD Corporation. Autoři se zabývali vlastnostmi některých komerčních MR kapalin vyrobených formou LORD: MRX-126PD, MRX-140ND, MRX-242AS a MRX-336AG. Byly také zkoumány tribologické vlastnosti, především třecí koeficient. Test byl proveden tak, že se dvě destičky třely o sebe. Jejich kontaktní plocha byla 7,6 cm x 7,6 cm a testovalo se v konfiguraci železo – železo nebo železo – nylon při vzájemné rychlosti 2,6 mm/s a přítláčné síle 10 – 20 N. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce **Tab. 2-1**.

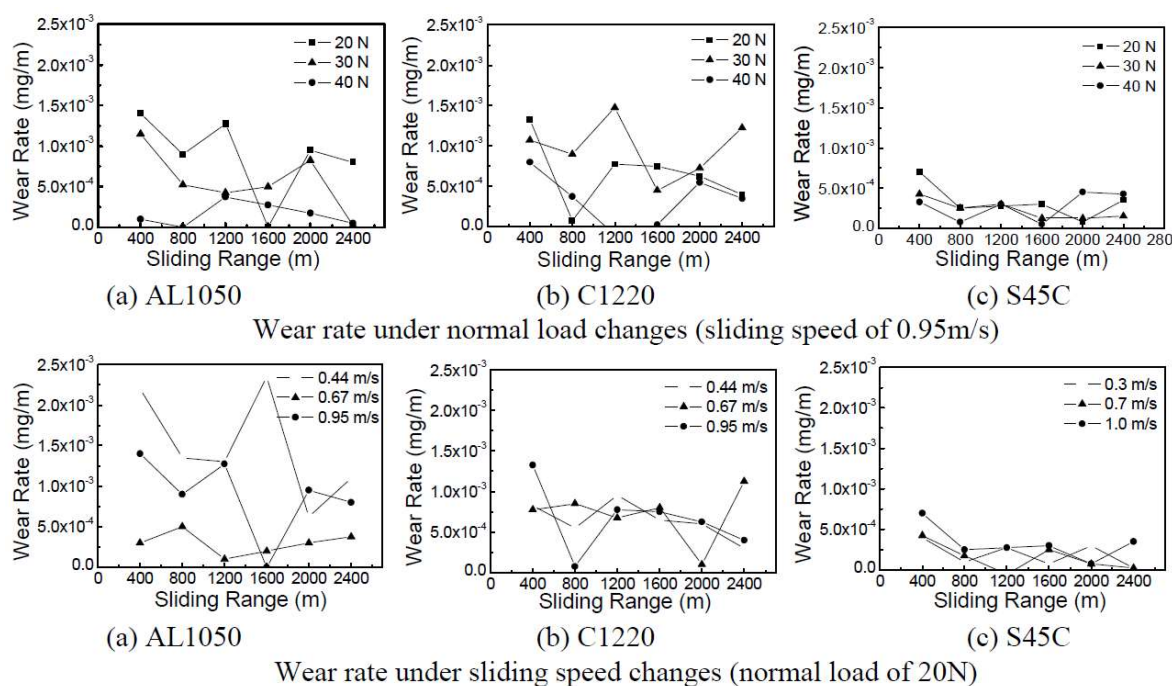
Tab. 2-1 Velikost koeficientu tření v závislosti na použité MR kapalině

	železo - železo	železo - nylon
Suché tření	0,18	0,19
MRX-126PD	0,04 – 0,07	0,04 – 0,07
MRX-140ND	0,07 – 0,09	0,06 – 0,07
MRX-242AS	0,05 – 0,07	0,05 – 0,07
MRX-336AG	0,08 – 0,11	0,08 – 0,11

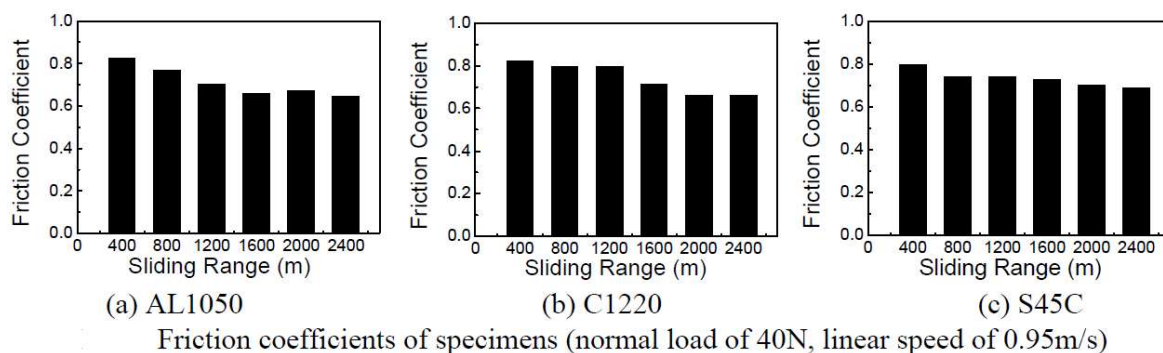
2.9.2 Wear Characteristics of Magnetorheological Fluid under Boundary Lubrication [11]

V této práci se autoři zaměřili na výzkum vlivu abraze MR kapalin při různých podmínkách na různých materiálech. Jako materiály byly použity: hliníková slitina AL1050, měď C1220 a ocel S45C. Byla použita metoda pin on disc, kdy byl disk průběžně namáčen v MR kapalině MRF-132DG a pin ze zkoušeného materiálu, který měl průměr 6 mm, na něho tlačil silou 20 N, 30 N nebo 40 N. Při tomto druhu testů se pin s diskem vzájemně pohybovaly rychlostí $0,95 \text{ m.s}^{-1}$. Zkoumáno bylo také opotřebení materiálu v závislosti na vzájemné rychlosti pinu a disku. Ta činila $0,44 \text{ m.s}^{-1}$, $0,67 \text{ m.s}^{-1}$ a $0,95 \text{ m.s}^{-1}$ při silovém působení pinu o velikosti 40 N. Opotřebení bylo měřeno na váhách s přesností $0,1 \text{ mg}$ a bylo vyhodnocováno jako hmotnostní úbytek vzorku na ujetý metr po disku. Výsledky poté byly zkontrolovány optickou kontrolou.

Výsledky opotřebení jsou zobrazené na Obr. 2-5 a koeficienty tření na Obr. 2-6. Celkově lze hodnotit, že testovaná ocel je odolnější vůči abrazi než zbylé dva materiály. Koeficienty tření jsou u všech tří materiálů podobné.



Obr. 2-5 Abrazie při různých podmínkách [11]



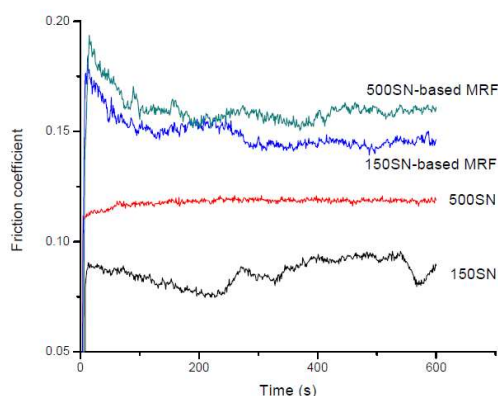
Obr. 2-6 Naměřený koeficient tření [11]

2.9.3 Research on the Friction and Wear Properties of Magnetorheological Fluids [12]

V této práci se autoři zabývali tribologickými vlastnostmi jimi připravených MR kapalin. Šlo o kapaliny založené na minerálních olejích 150SN a 500SN, ve kterých byly rozptýleny částičky karbonylového železa.

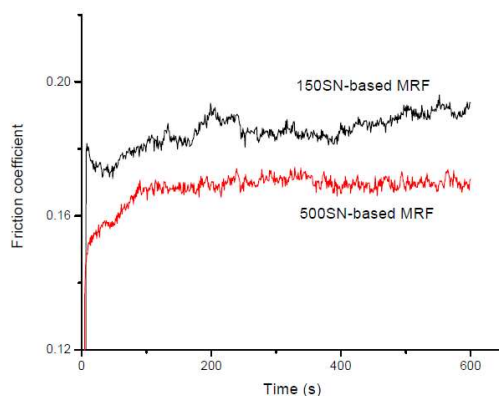
Test byl proveden v konfiguraci „four ball,“ kdy se tři kuličky z oceli 102Cr6 (v Číně značené jako GCr6) o průměru 12,7 mm a tvrdosti 58 – 62 HRC třely po povrchu čtvrté kuličky těch samých parametrů při zatížení 50 N a 600 ot/min, což znamená rychlost 0,56 m/s. v tomto testu bylo zjišťováno, jak se mění koeficient tření MR kapaliny v závislosti na základovém oleji.

Po přidání MR částic do oleje se koeficient tření zvedl 1,5 – 2 násobně, viz Obr. 2-7. Zvláště je, že v případě hustšího oleje má magnetické pole menší vliv na koeficient tření, a to dokonce natolik, že naměřený koeficient je menší než u oleje řidšího, jak to ukazuje Obr. 2-8. Je to dáno jeho vyšší viskozitou, kdy dokáže obalit MR částici lépe, než olej řidší, a tím dochází k menšímu styku částic s okolím.



Friction coefficient as a function of time for MRFs and base oils with load 50N, speed 600 rpm.

Obr. 2-7 Naměřené koeficienty tření bez mag. pole [12]



Friction coefficient as a function of time for MRFs in the presence of magnetic field (35mT) and a load of 50 N at 600 rpm.

Obr. 2-8 Naměřené koeficienty tření v mag. poli [12]

2.9.4 Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid [13]

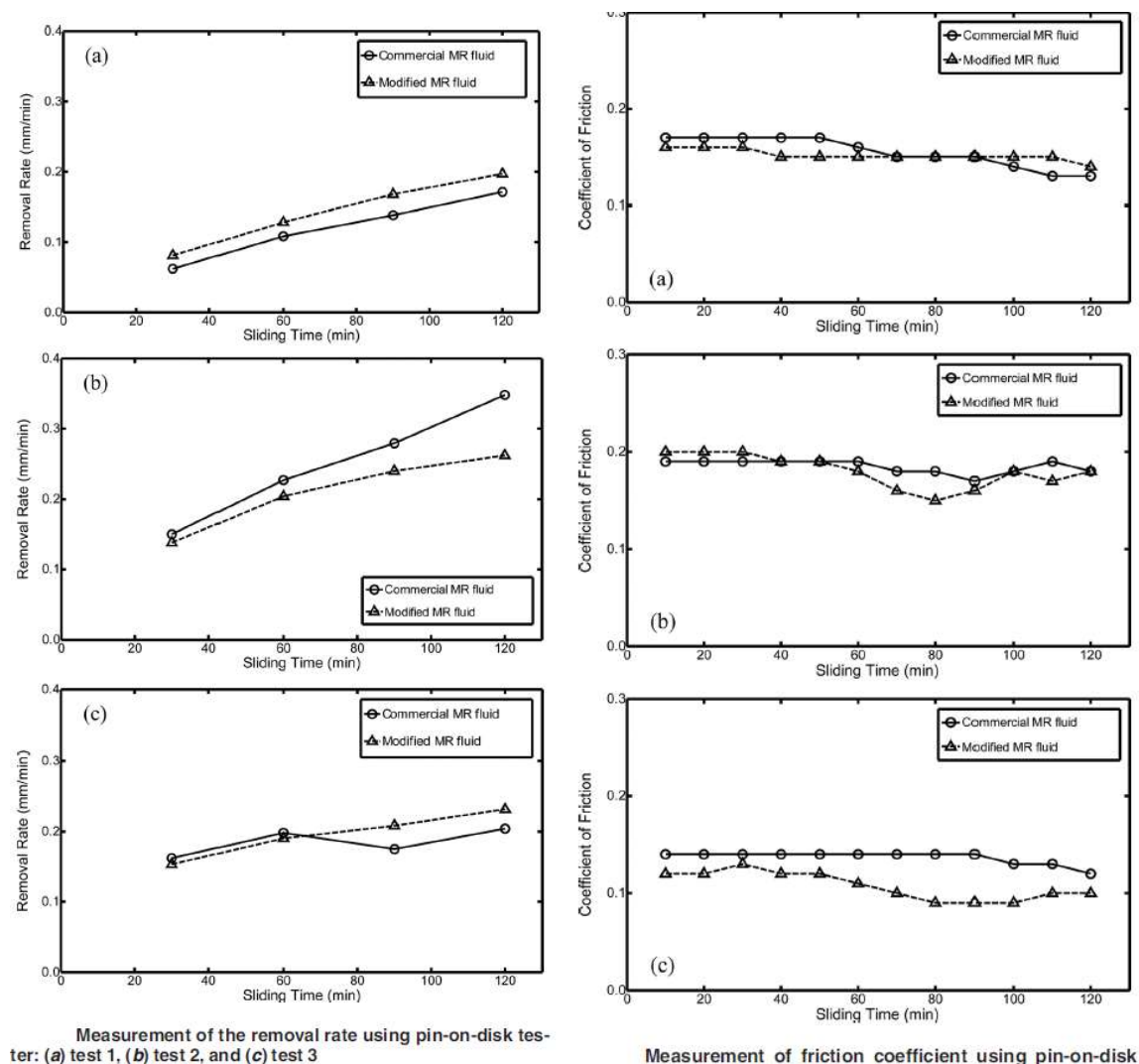
V tomto případě byly měřeny tribologické vlastnosti kapaliny MRF-132DG, především její modifikace dialkyldithiofosfátem zinku (Zn-DTP), dithiokabamátem molybdenu (Mo-DCP) a aminovým antioxidantem. Pro měření abrazivních vlastností byla zvolena metoda „four ball“ a pro měření tření metoda „pin on disk“ dle norem ASTM D5707 a ASTM D2266. Materiál pro vzorky je ocel C45E (v Koreji značené SM45C).

Při měření opotřebení vyšel průměr opotřebované plošky (wear scar diameter) u nemodifikované kapaliny více než 2x větší než u modifikované. To ukazuje lepší abrazivní vlastnosti modifikované kapaliny.

Tab. 2-2 Podmínky pro test [13]

Test condition of pin-on-disk					
	Test number	Load (N)	Velocity (rpm)	Time (h)	Gauss (G)
Commercial MR fluid	Test 1	50	297	2	5
	Test 2	100	297	2	5
	Test 3	50	425	2	5
Modified MR fluid	Test 1	50	297	2	5
	Test 2	100	297	2	5
	Test 3	50	425	2	5

Byly provedeny tři testy. V Tab. 2-2 **Tab. 2-2** Podmínky pro test jsou vypsány podmínky, při kterých se měřilo chování magnetoreologických kapalin. Pro nás je důležitý především součinitel tření a odběr materiálu (removal rate) zobrazených na Obr. 2-9 Nakonec byla také zkoumána kvalita povrchu pod mikroskopem SEM. Tam bylo zhodnoceno, že pin vystaven modifikované kapalině má lepší struktura povrchu než druhý.

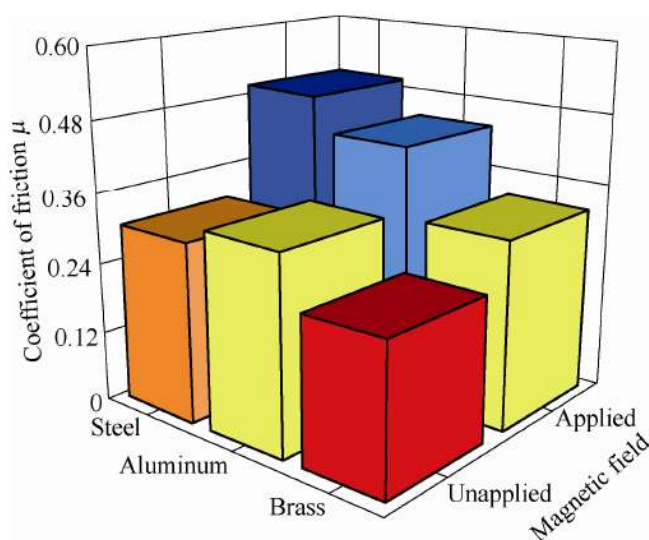


Obr. 2-9 Odběr materiálu (vlevo) a koeficient tření (vpravo) [13]

2.9.5 Friction Behavior of Magnetorheological Fluids with Different Material Types and Magnetic Field Strength [14]

Tato práce je věnována výzkumu velikosti třecího koeficientu různých materiálů v různých MR kapalinách v různém magnetickém poli. Zde byla využita metoda pin on disc. Disk měl rozměry $\varnothing 60 \times 10$ mm a pin $\varnothing 10 \times 20$ mm.

Celkově byly provedeny dva druhy testů. V prvním byl měřen vliv materiálu stroje na koeficient tření. Byly použity disk a pin z: oceli C45E (v Koreji značené SM45C), mosazi C2800 a hliníku AL6061. Byla použita kapalina MRF-132DG a měřilo se buď bez magnetického pole anebo za jeho přítomnosti o velikosti 9 mT. Disk rotoval s frekvencí 0,5 Hz, což znamená vzájemnou rychlost pinu a disku 0,0942 m/s. Výsledky jsou zpracovány graficky na **Obr. 2-10**. Zvláštností je relativně vysoký nárůst koeficientu u oceli, což je dáno její magnetizací.

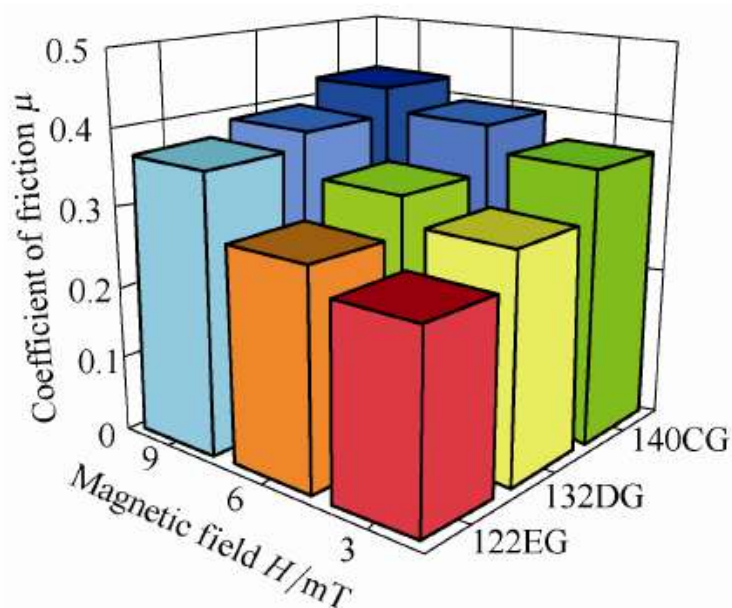


Obr. 2-10 Závislost koeficientů tření pro různé materiály a mag. pole [14]

Také bylo zkoumáno opotřebení pinu. Bohužel pouze optickým mikroskopem, takže nejsou k dispozici přesná data. Největší opotřebení se jevilo vždy při zkoušce v magnetickém poli. Zároveň ze tří zkoumaných materiálů vykazovala největší známky opotřebení ocel, především v testu s magnetickým polem.

Druhá část je věnována měření hliníkových instrumentů v kapalinách MRF-122EG, MRF-132DG a MRF-140CG. Zkoumal se také vliv velikosti magnetického pole na velikost koeficientů tření, proto byly měření provedeny v polích o velikosti 3 mT, 6 mT a 9 mT. Frekvence rotujícího disku byla v tomto případě 1 Hz, což znamená vzájemnou rychlost 0,188 m/s. Výsledky jsou zobrazené na Obr. 2-11.

Tady také bylo zkoumáno opotřebení stejným způsobem. Bylo konstatováno, že čím větší koeficient tření byl v testu naměřen, tím větší bylo opotřebení zkoumaných nástrojů.



Obr. 2-11 Koeficient tření pro různé MR kapaliny a mag.pole [14]

2.9.6 Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field [15]

V této práci byl zkoumán vliv magnetického pole na koeficient tření a abrazivitu MR kapalin. Pro tento test bylo použito pět modifikací MR kapaliny, které se lišily mazacími přísadami, viskozitou a základovým olejem dle Tab. 2-3.

Tab. 2-3 Složení MR kapalin [15]

No.	Suspended phase	Base oil	Thixotropy	Lubricate additives
MRF 1 [#]	Cl ^a	Mineral oil	Clay/SiO ₂	–
MRF 2 [#]	Cl	Mineral oil	Clay/SiO ₂	MoS ₂
MRF 3 [#]	Cl	Mineral oil	Clay/SiO ₂	C/MoS ₂
MRF 4 [#]	Cl	Synthetic oil	Clay	MoS ₂
MRF 5 [#]	Cl	Mineral oil	–	–

Pro tento test byla zvolena metoda four ball, kde navíc byla testovací aparatura obklopená cívkou pro zajištění magnetického pole. Mechanické podmínky byly pro všechny testy stejné. Rychlost rotace: 1500 ot/min a zátěžná síla: 196 N.

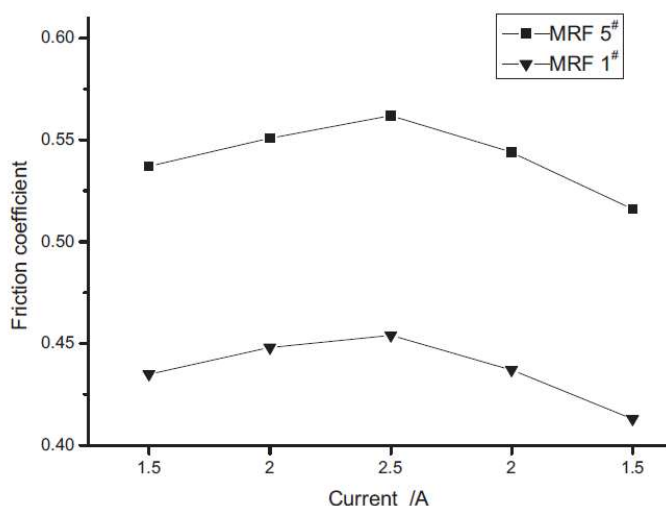
První část testu se uskutečnila s kapalinami MRF1 a MRF2. Tento test trval 10 minut a byl u něho naměřen vliv magnetického pole, koeficient tření a tzv. Wear scar diameter, čili průměr rýhy způsobené opotřebením. Hodnoty naměřené v této části testu jsou v tabulce.

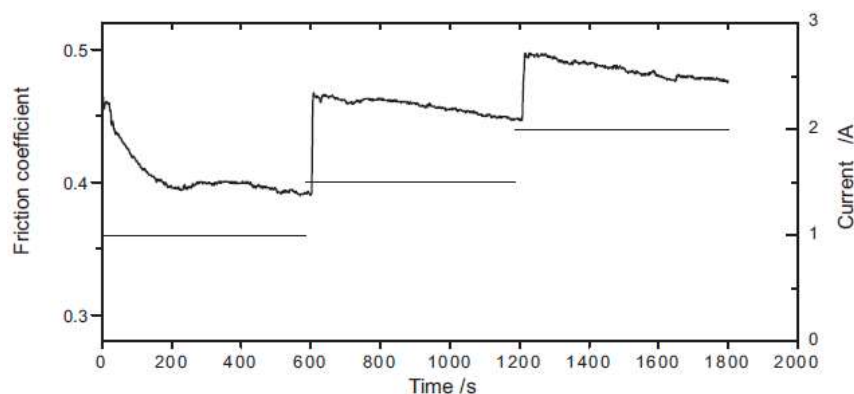
Tab. 2-4 Wear scar diameter a koeficient tření [15]

	0 T		0,12 T	
	COF	Wsd/mm	COF	Wsd/mm
MRF 1	0,0936	0,655	0,411	0,587
MRF 2	0,0915	0,588	0,401	0,576

Zcela dle očekávání byl při zapnutém magnetickém poli naměřen vyšší koeficient tření a to, více než čtyřikrát větší než při testu bez magnetického pole. Ovšem u opotřebení došlo k paradoxu, naměřený průměr rýhy byl menší. Tento paradox je způsoben nárůstem relativní viskozity MR kapaliny v magnetickém poli. MR kapalina je v tomto stavu v polotuhém skupenství a částice železa mají ztížený pohyb a nemohou se tolik podílet na opotřebení.

Druhá část se zabývala účinkem proměnlivého magnetického pole na koeficienty tření. Test byl veden stejně jako první, lišila se však jeho délka - od 25 do 30 minut. Při zvětšení mag. pole došlo ke zvýšení koeficientu tření. Při setrvání na určité hladině byl pozorován peak ve velikosti koeficientu těsně po zvýšení intenzity mag pole a poté došlo k jeho ustálení. Při snížení intenzity došlo k poklesu koeficientu tření a to vždy na nižší úroveň, než byla pozorována při stejné intenzitě mag. pole při rostoucí intenzitě mag. pole. (Obr. 2-12, Obr. 2-13).

**Obr. 2-12** Průměrná velikost koeficientu tření na proudu vytvářejícím mag. pole (1,5 A = 0,14 T, 2 A = 0,17 T, 2,5 A = 0,21 T) [15]

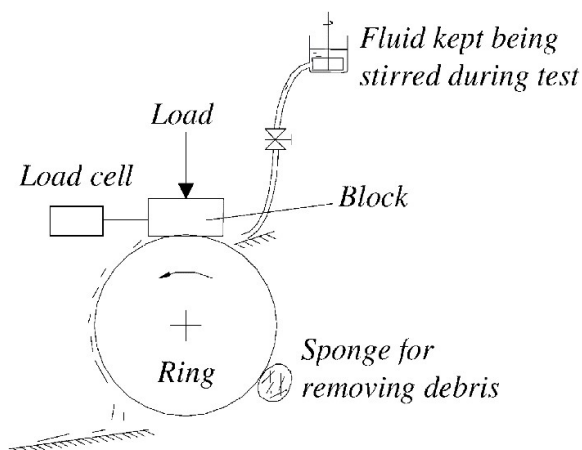


Obr. 2-13 Velikost koeficientu tření na proudy vytvářejícím mag. pole u MRF4 (1 A = 0,8 T, 1,5 A = 0,14 T, 2 A = 0,17 T) [15]

2.9.7 Tribological performance of a magneto-rheological suspension [16]

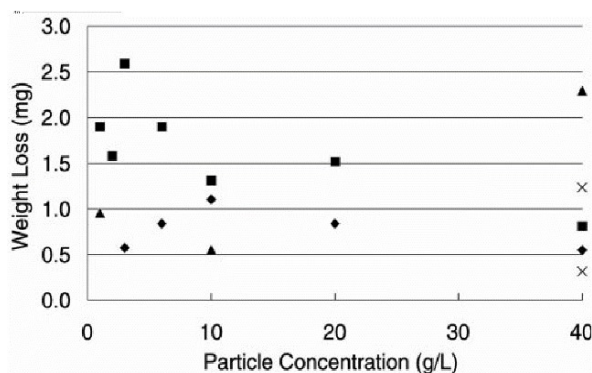
Autoři tohoto článku zkoumali vliv množství rozptýlených částic v magnetoreologických a elektoreologických kapalinách. Zkoumali vliv částic na strukturu povrchu, na hmotnostní úbytek a na koeficient tření. Magnetoreologické částice byly získány z kapaliny LORD MRF132, poté byly očištěny a následně byly přidávány do základového oleje dle požadavků testu.

Test probíhal metodou block-on-ring (dle Obr. 2-14) při rychlosti 0,325 m/s a zatížení 532 N po dobu 1 hodiny.

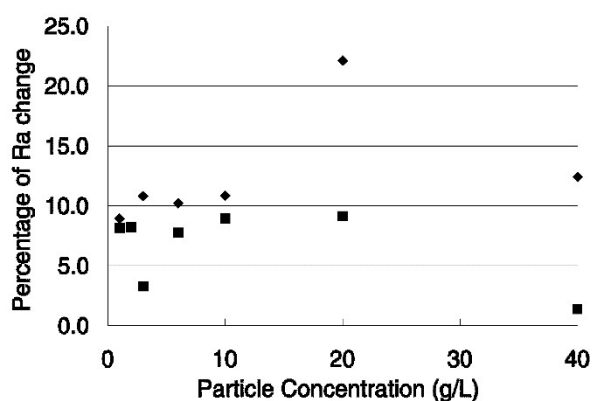


Obr. 2-14 Testovací aparatura [16]

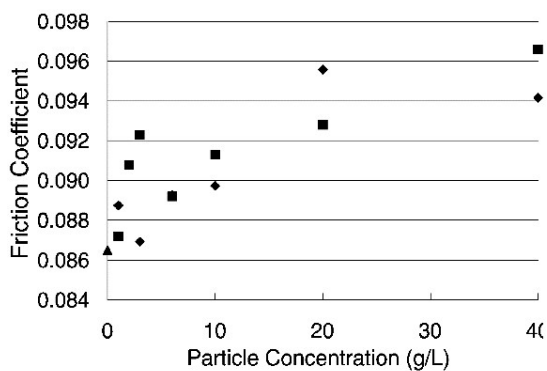
Naměřené výsledky jsou vidět na obrázcích (Obr. 2-15, Obr. 2-16, Obr. 2-17). Dle naměřených výsledků můžeme říci, že čím více bude částic MR kapaliny, tím větší bude koeficient tření, ale naopak opotřebení materiálu by mělo klesnout. Na strukturu povrchu nemá počet částic znatelný vliv.



Obr. 2-15 Závislost úbytku hmotnosti na koncentraci částic [16]



Obr. 2-16 Závislost procentuální změny struktury povrchu na koncentraci částic [16]



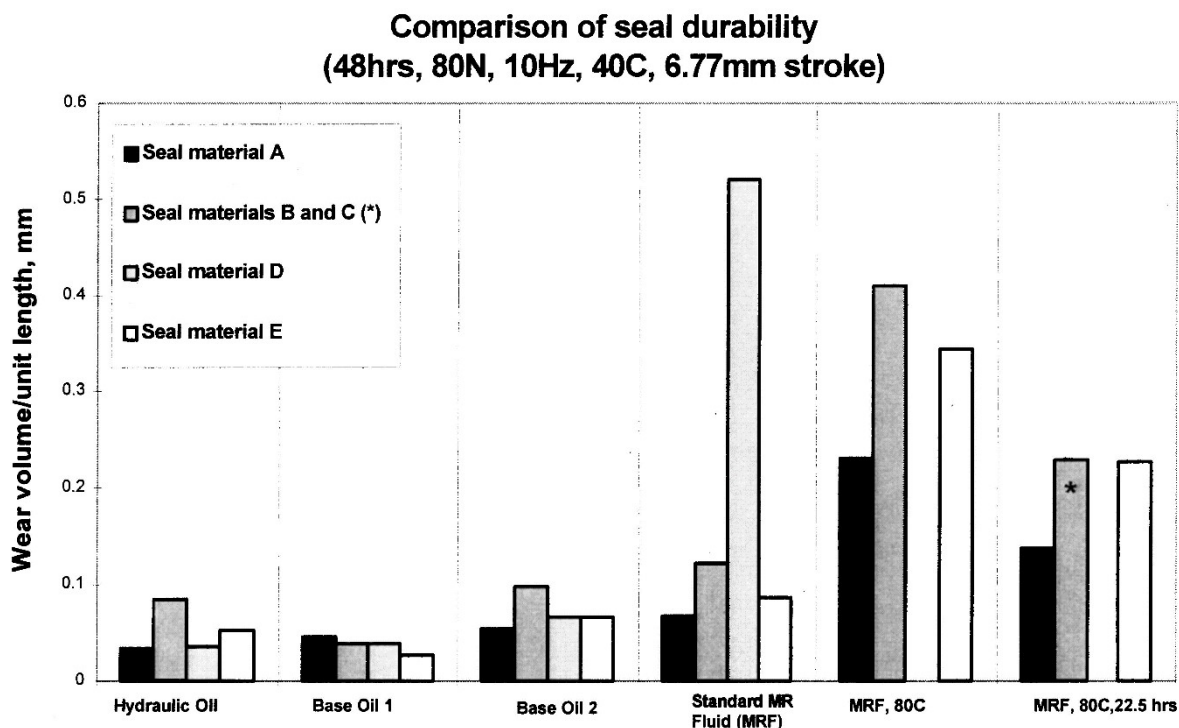
Obr. 2-17 Závislost koeficientu tření na koncentraci částic [16]

2.9.8 Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids [17]

Tato práce je zajímavá, i když nebylo publikováno opotřebení kovových součástí. Zde byl měřen účinek MR kapaliny na degradaci těsnění. Je zde prezentován velmi zajímavá metoda testování, vyvinutá přímo pro napodobení specifických podmínek v hydraulickém tlumiči.

Je to interní metoda firmy General Motors a spočívá v tom, že ocelová tyčinka recipročně přejíždí válcovou plochou po bloku o rozměrech 30 x 10 mm vyrobeného z testovaného materiálu. Na tyčinku působí zatížení 80 N a pohybuje se po dráze 6,77 mm frekvencí 10 Hz. Opotřebení je určováno hloubkou drážky.

Výsledky, ač jsou měřeny na materiálu úplně jiných vlastností, jsou také zajímavé. Zde bylo naměřeno, že velikost opotřebení materiálu je při použití MR kapaliny 2x až 8x vyšší, než při využití hydraulického oleje. Velkou roli hrál jak použitý materiál, tak podmínky testu.



Obr. 2-18 Velikost opotřebení materiálů

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Cíl práce

Cílem práce je změřit vliv komerčních MR kapalin od společnosti LORD Corporation (MRF-122EG, MRF-132DG a MRF-140CG) na opotřebení těla MR tlumiče za použití tribometru Bruker UMT Tribolab a profilometru Bruker Contour GT-X8. Dílčím úkolem je samotné nastavení měřicího cyklu.

3.2 Analýza problému

Jak bylo řečeno dříve, MR kapaliny obsahují vysoké množství železných částic, proto se tyto kapaliny vyznačují zvýšeným abrazivním působením na prvky mechanických zařízení. To platí i pro MR tlumiče, jejichž opotřebení je hlavní motivací pro toto měření.

Dle rozboru prací provedeném v kapitole 2.99 je možno vidět, že výsledky prací zkoumající závislost abrazivity MR kapalin je se liší. Zatímco práce popsaná v kapitole 2.9.5 hodnotí, že abraze je přímo úměrná koeficientu tření, tudíž se zvyšuje s rostoucí koncentrací MR částic v kapalině, tak práce v kapitole 2.9.7 tuto teorii vyvrací a tvrdí, že při zvětšování mag. pole působícího na MR kapaliny a při zvyšování počtu částic v kapalině, je omezena schopnost částic se relativně pohybovat a tím menší je opotřebení povrchu danou kapalinou. Nicméně tuto obě práce je nutno brát trochu s rezervou, poněvadž u práce v kapitole 2.9.7 je koncentrace částic v kapalině znatelně menší, než u testovaných kapalin, a u práce v kapitole 2.9.5 je test proveden v poměrně slabém magnetickém poli.

Abrazivita MR kapalin však není závislá pouze na koncentraci částic či vnějším magnetickém poli. Pro redukci abraze můžeme také kapaliny modifikovat různými aditivami na bázi molybdenu či zinku.

Tribologické vlastnosti MR kapalin se také odvíjí od použitého základového oleje. V kapitole 2.9.3 bylo zjištěno, že oleje u různých viskozitách se chovají jinak s aplikovaným a bez aplikovaného magnetické pole. Dle závěru autorů této práce je to proto, že hustší kapalina o větší viskozitě lépe „obalí“ částičky železa. Dle tohoto závěru se dá uvažovat, že MR kapalina založená na hustším oleji bude mít menší abrazivní schopnosti, než ty založené na řidším.

Zároveň žádná práce nepracovala s Millerovým číslem jako hodnotitelem abrazivity suspenze a tudíž Millerův test není využívanou metodou pro testování míry abrazivity MR kapalin. To přináší do testování určitou volnost. Test může být upraven tak, aby lépe reflektoval cíle práce.

Nejvhodnější metodou rozebranou v řešerši je pravděpodobně ta použitá v kapitole 2.9.8. Ta nejlépe reflektuje podmínky, které jsou uvnitř tlumiče. To znamená užití recipročního pohybu pro test a nastavení testu tak, že napětí působící mezi oběma elementy je liniové, stejně jako je stykové napětí těsnících prvků s aktivními částmi tlumiče.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Materiál

4.1.1 Testované MR kapaliny

V rámci bakalářské práce budou testovány tři komerční MR kapaliny: MRF-122EG, MRF-132DG a MRF-140CG. Všechny tyto kapaliny jsou vyráběny společností LORD Corporation. Všechny tyto kapaliny jsou určeny pro univerzální použití a mohou být použity v aplikacích, kde dochází k průtokovému nebo smykovému modu použití MR kapalin.

Tab. 4-1 Vlastnosti testovaných MR kapalin [18–20]

	MRF-122EG	MRF-132DG	MRF-140CG
Vzhled	Tmavě šedá kapalina	Tmavě šedá kapalina	Tmavě šedá kapalina
Viskozita (40 °C)	0.042 ± 0.020 Pa.s	0.112 ± 0.020 Pa.s	0.280 ± 0.070 Pa.s
Hustota	2.28-2.48 kg/m ³	2.95-3.15 kg/m ³	3.54-3.74 kg/m ³
Hmotnostní poměr pevných částic	72 %	81 %	85,44 %
Teplota vzplanutí	>150 °C	>150 °C	>150 °C
Teplota použití	[-40; +130] °C	[-40; +130] °C	[-40; +130] °C

4.1.2 Referenční olej Paramo HM 32

Paramo HM 32, vyráběný firmou Paramo a.s., je minerální hydraulický olej určený pro univerzální použití, především pro hydrostatické hydraulické mechanismy vybavené hydrogenerátory, celoročně pracující mobilní hydrauliky, k mazání namáhaných oběhových soustav, ozubených převodů aj. Na rozdíl od olejů HM 46 a HM 68 je aditivován s ohledem na nižší teploty použití, především zimní provoz.

Tab. 4-2 Vlastnosti oleje Paramo HM 32 [21]

Hustota (20°C)	868 kg/m ³
Kinematická viskozita (40 °C)	32 mm ² /s
Dynamická viskozita (-20°C)	2,5 Pa.s
Viskozitní index	105
Bod vzplanutí	180 °C
Bod tekutosti	-36 °C

4.2 Tribometr Bruker UMT Tribolab

Bruker UMT Tribolab je univerzální tribometr vyráběný firmou Bruker Corporation. Velikost přístroje (39.1 x 65.4 x 77.8) cm. Přístroj má rám vyroben z šedé litiny, aby konstrukce dovedla tlumit rázy vznikající při provozu. Obsahuje plně regulovatelný motor, jenž je schopen pracovat v otáčkách od 0,1 do 5000 RPM a točivý moment motoru se reguluje od 0,01 do 7 Nm. Může být vybaven speciálními systémy, které dovolují testovat při teplotách od -30 °C a do 1000 °C.



Obr. 4-1 Tribometr Bruker UMT Tribolab [22]

Samotná konstrukce měřicího zařízení je flexibilní. Různé konfigurace dovolují měření ve všech konfiguracích pohybu uvedených v kapitole 2.5.

Měřicí zařízení se skládá z dvou částí, horní a dolní. Horní hlava se skládá s přítlačné části a měřících senzorů. Tato součást je snadno zaměnitelná za jiné hlavy, aby byla zajištěna co největší flexibilita měření. Spodní část obstarává požadovaný pohon a zajišťuje požadované okolní podmínky pro měření.

Volitelně může být tribometr vybaven širokou paletou doprovodných systému, které mohou být využity při měření. Mohou to být: AFM mikroskop, optický digitální mikroskop, nanointender či různé čidla, měřící silové, akustické či elektrické vlastnosti materiálu během testu.

Tab. 4-3 Vlastnosti pro přímočarý posuv [22]

Max. velikost posunu	120 mm
Rozlišení	1 μm
Rychlost posunu	0,001 – 10 mm/s
Max. zátěžná síla	2000 N
Max. boční síla	450 N

Tab. 4-4 Vlastnosti pro vratný cyklus [22]

Max. posuv	25 mm
Min. posuv	0,1 mm
Rozlišení	1 μm
Rychlost pohybu	0,1 – 60 Hz
Max. zátěžná síla	2000 N
Max. frekvence při posuvu	60 Hz – 2 mm 20 Hz – 25 mm

4.3 Profilometr Bruker Contour GT-X

Profilometr Bruker Contour GT-X je univerzální automatizovaný profilometr. „Zdrojem světla v objektivu je dual-LED dioda. Na profilometru je otočný adaptér, který je schopen nést až 5 interferometrických objektivů.“ [23] Celkové zvětšení od objektivů a čoček se pohybuje rozmezí od 0,825 do 230 [24] a přístroj disponuje vertikálním rozlišením 0,1 nm do 10 mm. Pro zajištění přesnosti měření je celý systém vzduchově odpružen. Profilometr je ovládán skrz software Vision64, který také slouží k úpravě a vyhodnocení dat.



Obr. 4-2 Profilometr Bruker ContourGT-X [24]

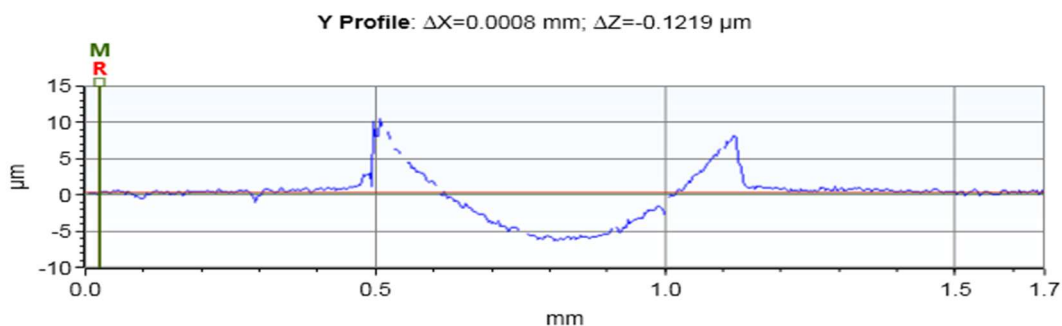
4.4 Určení metodiky měření

V tomto případě bude test probíhat na přístroji Bruker UMT Tribolab recipročním třením testovacího pinu po lineárně pohybujícím se vzorku. Test nebude proveden v magnetickém poli. To by snížilo hodnotu opotřebení.

Testovat se bude na destičce o velikosti 43,5 x 30 x 5 mm vyrobené z materiálu S355, což je velmi podobný materiál, jako je používán na výrobu tlumičů. Ty bývají většinou vyrobené z materiálu E355, což je chemicky stejný materiál, ale je vytvarován do trubek. Jako pin bude sloužit ložisková kulička o průměru ¼ palce, tzn. 6,35 mm.

Vyhodnocení opotřebení bude probíhat na optickém profilometru Bruker Contour GT-X8. Budou posuzovány dvě základní kritéria abraze. Prvním bude měření hloubky drážky vůči původnímu povrchu. Toto jednoduché kritérium poskytne základní představu o míře opotřebení.

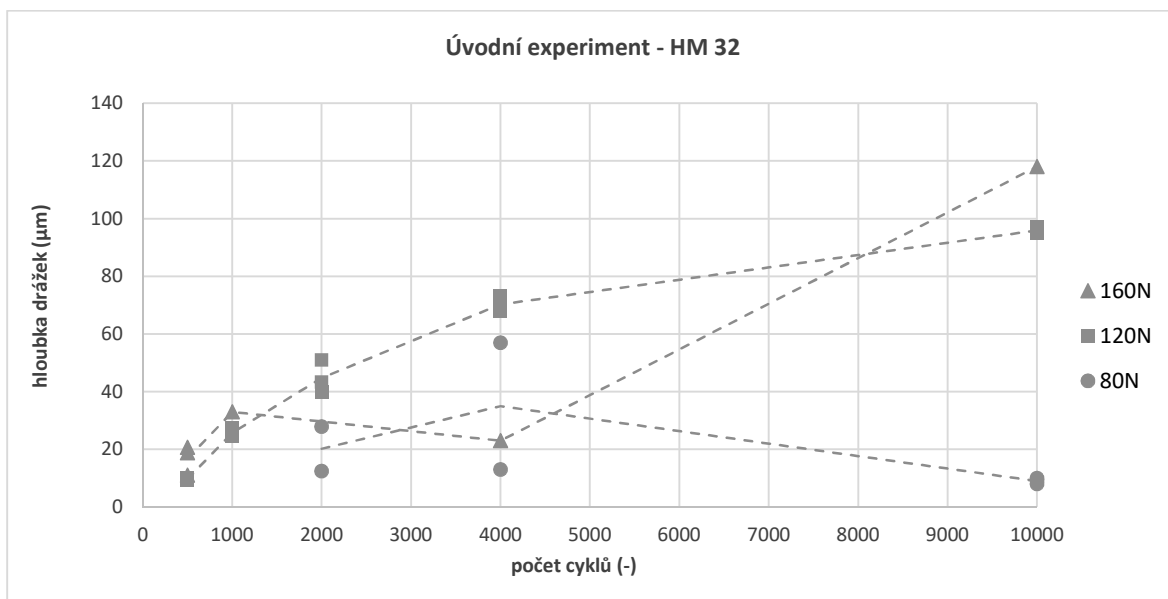
Ovšem vzhledem ke zvolené metodě testování dochází v drážce nejenom k abrazi či jinému odběru materiálu, ale také k vytlačování materiálu ze středu drážky na stranu. Tento materiál se nedá považovat za odebraný. Proto hlavní vyhodnocení bude provedeno porovnáním hmotnostního úběru materiálu z dané drážky.



Obr. 4-3 Profil drážky (nad čarou vytlačený materiál)

4.5 Nastavení parametrů testu

Pro naměření relevantních výsledků bylo nejprve nutno nalézt ideální hodnoty přítláčné síly, vzájemné rychlosti pinu a destičky a počtu cyklů, provedených jednotlivých měření. Hlavním kritériem pro výběr parametrů byla stabilita procesu měření a měřitelnost samotného opotřebení. Pro první měření byla zvolena amplituda výchylky 5 mm a frekvence 4 Hz. Test probíhal s hydraulickým olejem HM 32 při zátěžné síle 80 N, 120 N a 160 N (**Obr. 4-4**).



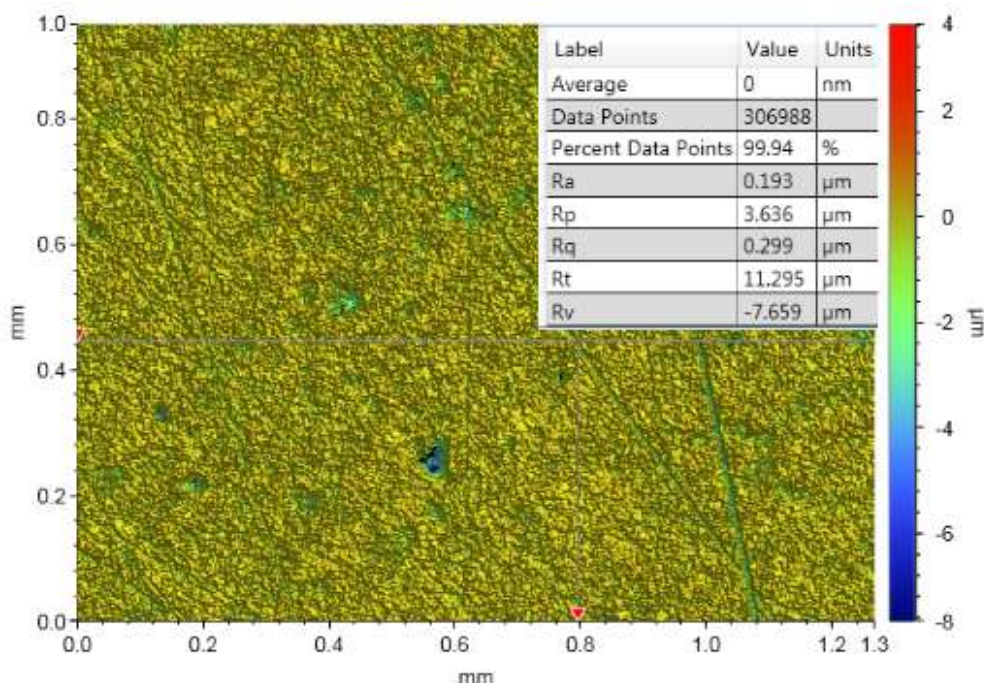
Obr. 4-4 Úvodní experiment

Z prvního testu je zřejmé, že při zátěži 80 N a 160 N není opotřebení stabilní. Byla vyslovena hypotéza, že problém je způsoben slip-stick jevem, který způsobuje nadměrné a nerovnoměrné opotřebovávání. (**Obr. 4-5**)

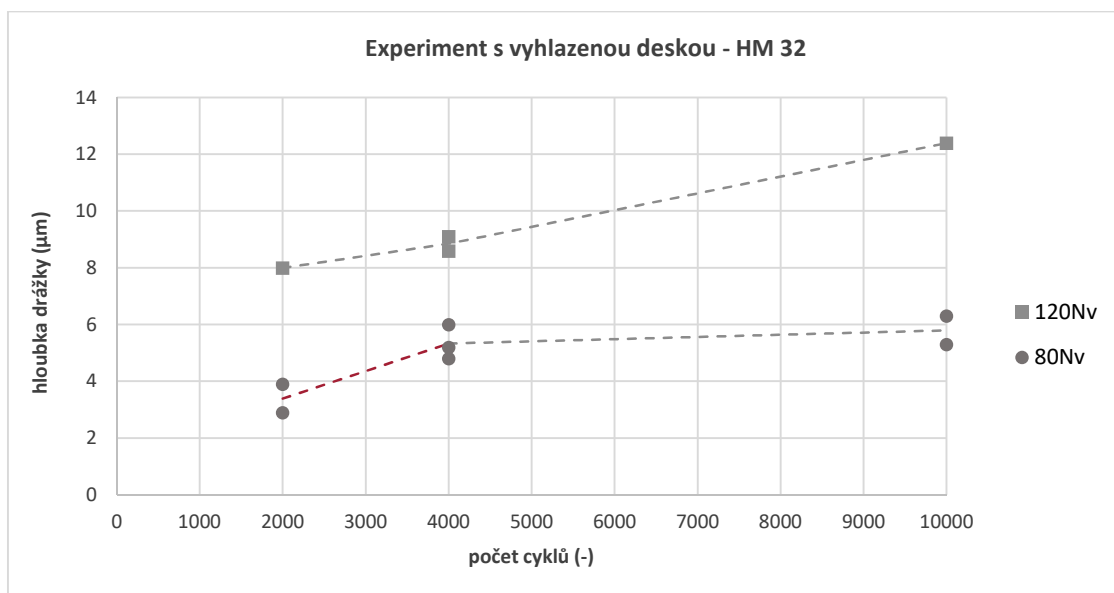


Obr. 4-5 Drážky vytvořené při zátěži 80 N po 4000 cyklech

Pro odstranění tohoto jevu, byl povrch destičky postupně vyhlazen brusným papírem drsností 320, 400, 600, 800, 1000 a následně diamantovou brusnou pastou (ACH 14/10 N) na keramické dlaždici. Drsnost se snížila z R_a 0,96 na $R_a < 0,2$, což bylo zjištěno na optickém profilometru. Při následném opakování experimentu již byl proces opotřebení stabilní, přičemž míra opotřebení rapidně poklesla. (Obr. 4-7)

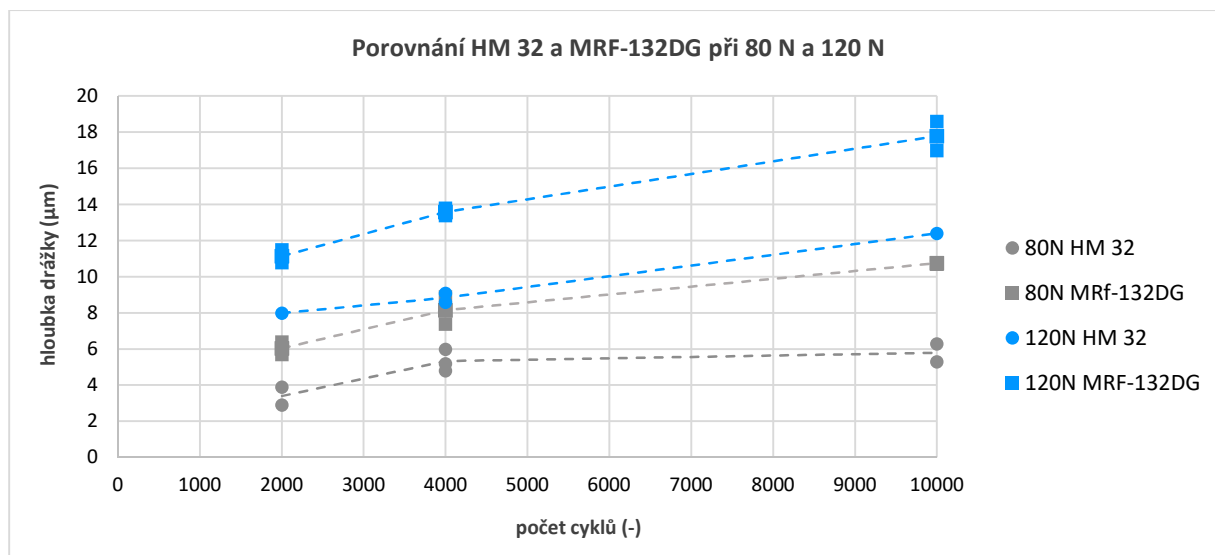


Obr. 4-6 Drsnost povrchu po vyhlazení



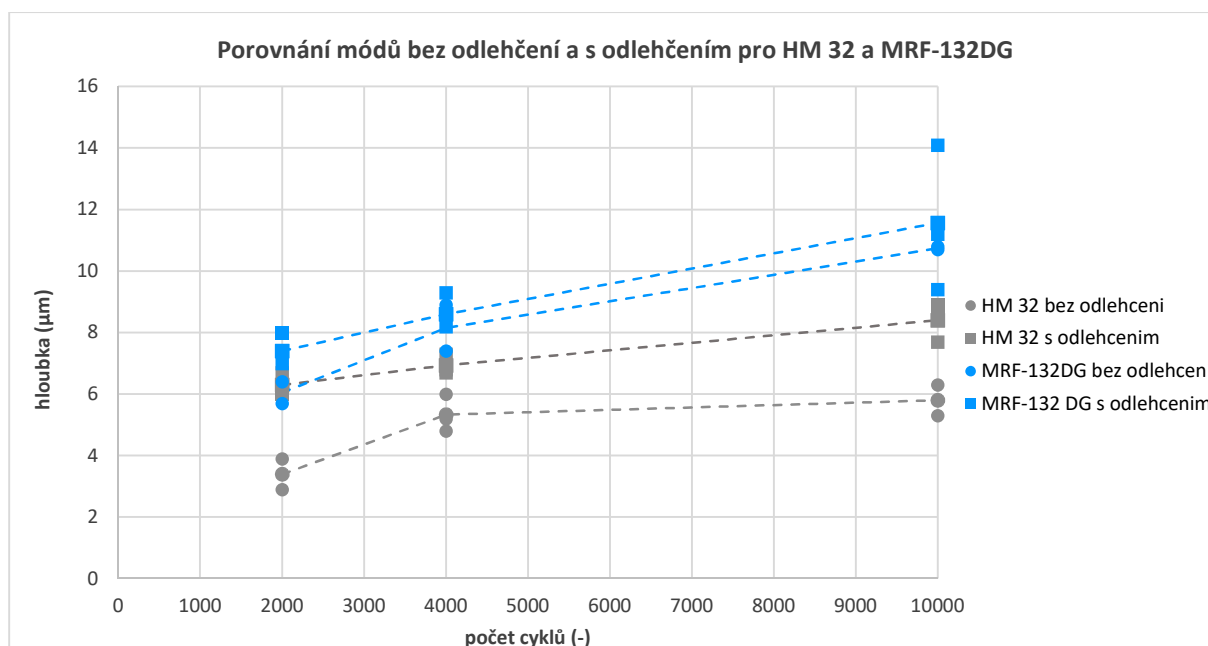
Obr. 4-7 Experiment s vyhlazenou deskou

Dalším krokem bylo zopakování experimentu s kapalinou MRF-132DG. Potvrdilo se, že MR kapalina má vyšší abrazivitu, než hydraulický olej. (Obr. 4-8)



Obr. 4-8 Porovnání opotřebení pro HM 32 a MRF-132DG při 80 N a 120 N

Posledním krokem předběžného experimentu byl test hypotézy, že kulička časem z kontaktu vytlačí MR částice. Pokud by byl pin s kuličkou každých 50 cyklů odlehčen, aby MR kapalina s částicemi natekla zpátky do drážky, dle hypotézy by se mělo zvýšit opotřebení. U hydraulického oleje by se tento jev neměl projevit. (Obr. 4-9)



Obr. 4-9 Porovnání opotřebení pro HM 32 a MRF-132DG při 80 N a 120 N

Ukázalo se, že při odlehčování pinu míra opotřebení stoupne jak u hydraulického oleje, tak i u MR kapaliny. Zvýšené opotřebení tedy není způsobeno vytlačení MR částic z kontaktu. Předpokládám, že zvýšené opotřebení způsobuje jiný režim tření, ke kterému dochází při rozjezdu a dojezdu pinu mezi fázemi odlehčení, kdy je rychlost pohybu pinu nižší, což vede k režimu mazání s vyšší koeficientem tření.

Pro testování dalších kapalin byly zvoleny následující parametry:

- amplituda: 5 mm
- frekvence pohybu: 4 Hz
- přítláčná síla: 80 N
- počet cyklů: 2000, 4000, 7000 a 10000
- struktura podložky: Ra 0,2

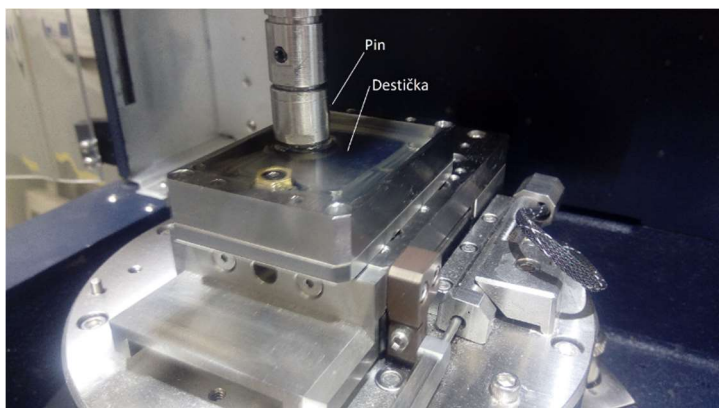
Jako pin, který se bude třít po destičce, je použita ložisková kulička o průměru 6,35 mm. Každé měření se bude opakovat 3x, pro odstranění alespoň části náhodného faktoru.

4.6 Příprava vzorků a metodika měření

Každá destička byla připravena k měření následujícím způsobem. Povrch destičky byl vyleštěn brusným papírem o drsnosti 320, 400, 600, 800, 1000 a následně diamantovou pastou. Destička byla očištěna od prachu a na optickém profilometru poté byla na dvou místech změřena struktura povrchu (v náhodném místě ve středu a na okraji destičky) a pokud byla struktura menší než Ra 0,2, byla destička připravena k použití.

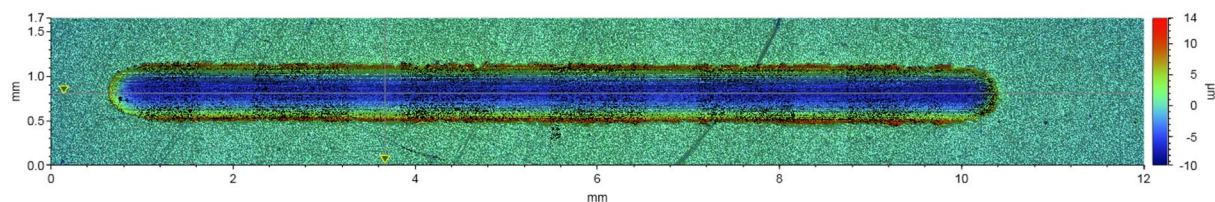
MR kapalina byla rozmíchána vřetenovou míchačkou po dobu 30 minut. Během této operace tribometr Bruker UMT Tribolab byl připraven k měření. K pohyblivé, spodní části byla přišroubovaná vanička, do které se poté připevnil zkoumaný vzorek. K vrchní části bylo namontován siloměr a k němu připevněn pin. Tribometr byl kalibrován pomocí stavěcích šroubů tak, aby v nezatíženém stavu vykazoval nulové silové zatížení.

Destička byla připevněna do vaničky a byla zalita 12 ml testované MR kapaliny či oleje. Poté byl příslušný cyklus spuštěn. Při testování první kapaliny byla daná kapalina měněna za čerstvou při každé změně testovacích podmínek, tzn. po provedení všech tří měření při stejném počtu cyklů. Po zjištění na prvním vzorku, že kapalina nedegraduje natolik, aby ovlivňovala přesnost měření, byla kapalina měněna po 39 000 cyklech. Na zbylých 30 000 cyklů byla použita kapalina nová.



Obr. 4-10 Měřicí sestava (test v oleji HM 32)

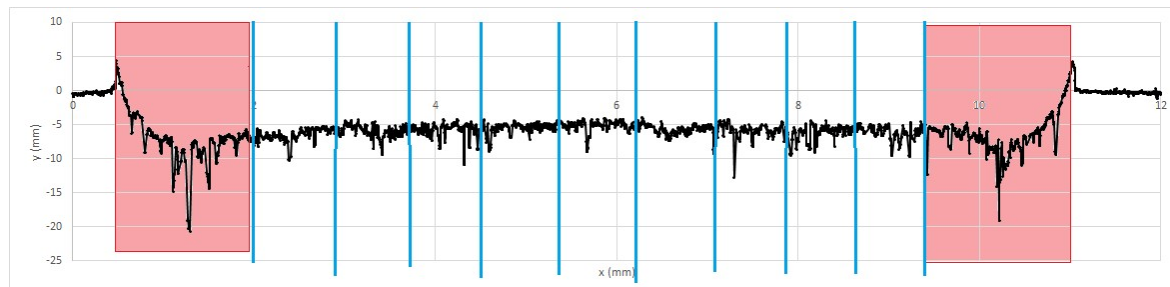
Jakmile byly dokončeny všechny měření pro jednu kapalinu, byla destička očištěna a hloubka drážky změřena na profilometru. Aby bylo eliminováno zkreslení výsledků měření nějakou lokální poruchou drážky, byla hloubka drážky změřena 10x. Bylo vytvořeno několik snímků drážky, ze kterých poté byl automaticky, pomocí funkce *stitching*, vytvořen jeden 3D model drážky.



Obr. 4-11 Profil drážky z profilometru

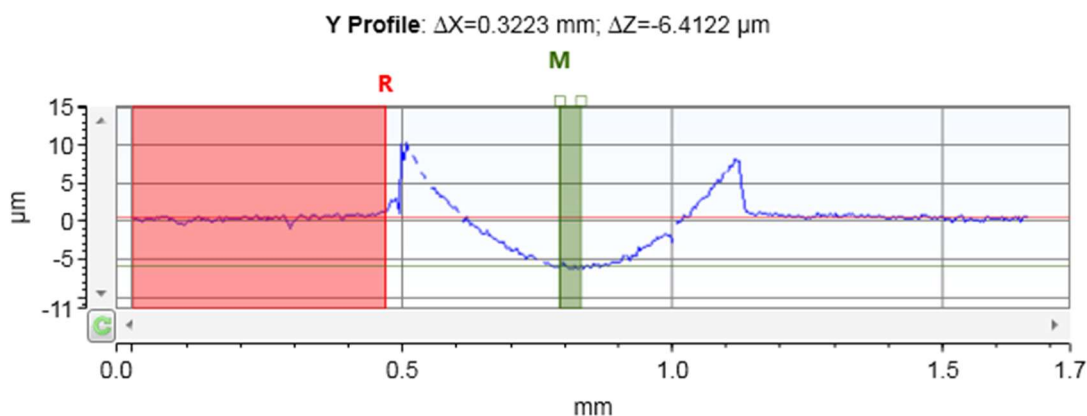
4.7 Metodika vyhodnocení

Z 3D modelu vyšlo najevo, že přibližně 1,5 mm z každé strany drážky je opotřebení vyšší. To je způsobeno nestálou rychlostí pinu v krajních polohách, kde dochází k reverzaci pohybu. Pin tak nemá dostatečnou rychlost a mění se pravděpodobně mód mazání i tribologické vlastnosti ve styku pinu s destičkou. Proto nebyly tyto krajní oblasti započítány do měření opotřebení. (Obr. 4-12)



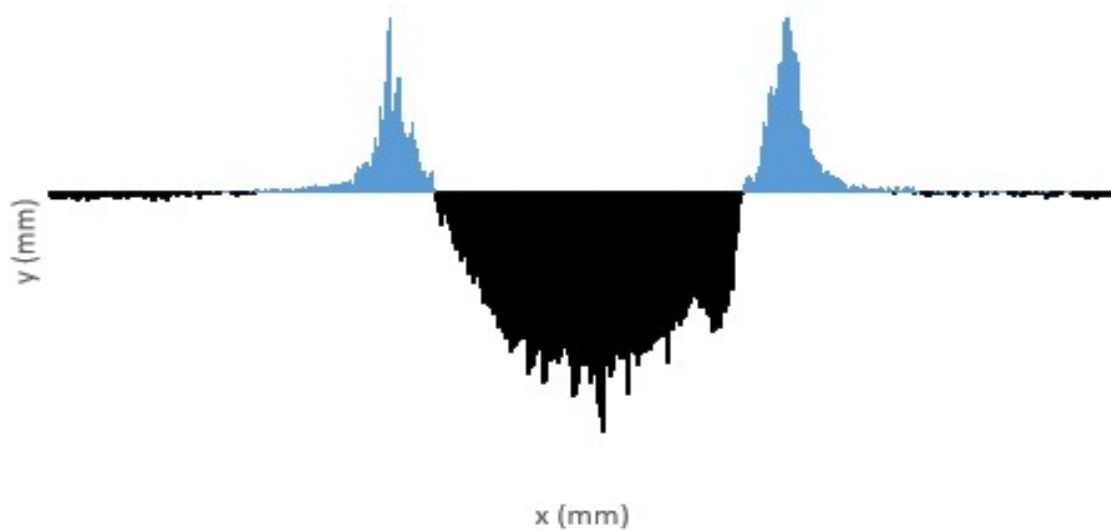
Obr. 4-12 Podélný profil drážky (červeně – krajní oblastní, modrá - místa odečtu hodnot)

Na zbylém profilu byly udělány pravidelné řezy kolmo na osu drážky tak, aby byly rovnoměrně rozmístěny po celé zbývající délce drážky. Z profilu byla přímo v programu Vison64 odečtena hloubka drážky v daném profilu. Daná hloubka je vždy průměrem hodnot odečtených z intervalu přibližně 0,05 mm, protože při měření profilometrem mohou být některé hodnoty zaznamenány nesprávně či nejsou zaznamenány vůbec.



Obr. 4-13 Profil drážky (červená čára: nulová hodnota, červená oblast: oblast výpočtu nulové hodnoty, zelená oblast: oblast určení hloubky drážky)

Úběr materiálu byl počítán tak, že hodnoty polohy povrchů pro celý profil drážky byly uloženy a následně z nich byl vypočten plošný úbytek materiálu v daném řezu pomocí integrace lichoběžníkovou metodou z křivky profilu drážky. Po vypočtení úbytku ve všech řezech na dané drážce, byly plochy zprůměrovány a průměrný plošný odběr byl vynásoben délkou drážky (10 mm). Z tohoto průměrného objemového úbytku byla dopočítána hmotnost, přičemž bylo počítáno s hustotou oceli 7850 kg/m³.



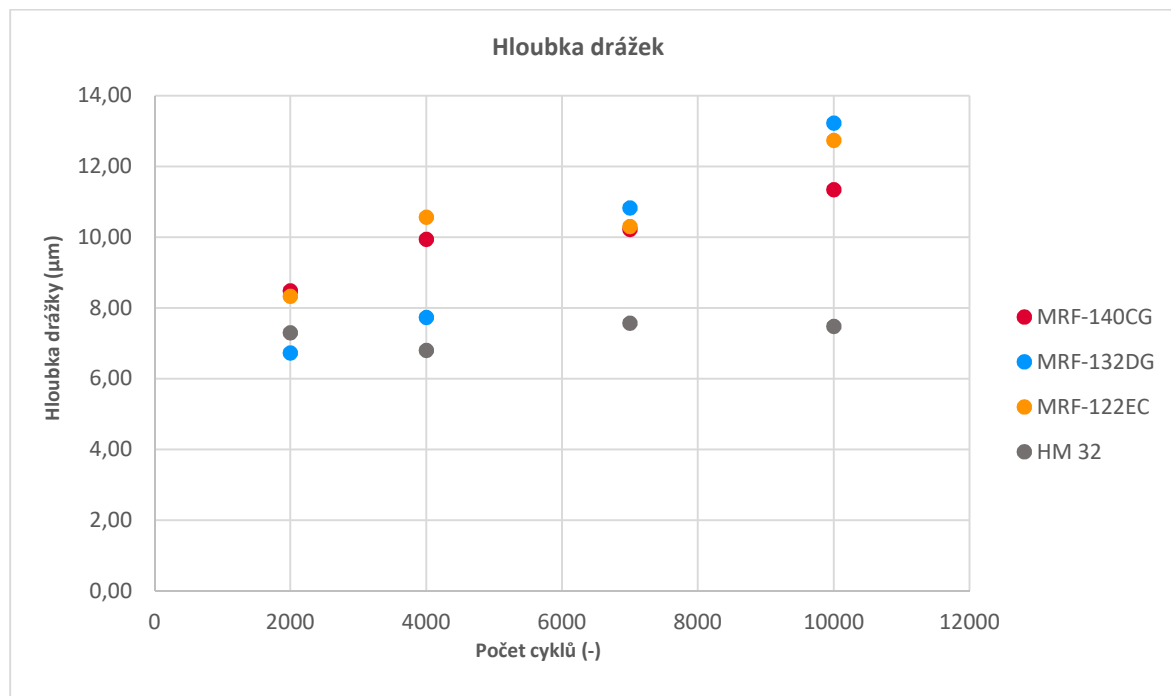
Obr. 4-14 Příčný profil drážky (modře – vytlačený materiál, černě - odebraný materiál, plošný odběr – černá mínus modrá plocha)

5 VÝSLEDKY

Naměřený a vypočtený hloubkový úbytek je zaznamenán v Tab. 5-1 a v **Obr. 5-1**, hmotnostní zase v Tab. 5-2 a Obr. 5-2. Podle porovnání výsledků můžeme soudit, že výsledkové trendy pro oba druhy vyhodnocení opotřebení drážek jsou si podobné.

Tab. 5-1 Průměrná hloubka drážek

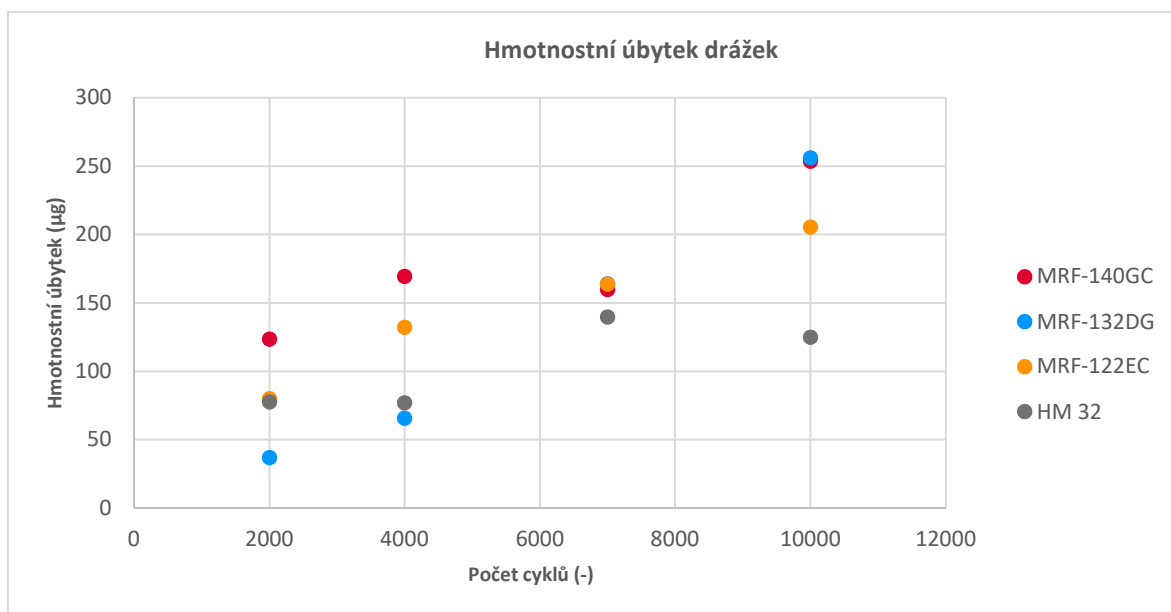
Počet cyklů	MRF-122EC	MRF-132DG	MRF-140CG	HM 32
-	μm	μm	μm	μm
2 000	8,3	6,7	8,5	7,3
4 000	10,6	7,7	9,9	6,8
7 000	10,3	10,8	10,2	7,6
10 000	12,7	13,2	11,4	7,5



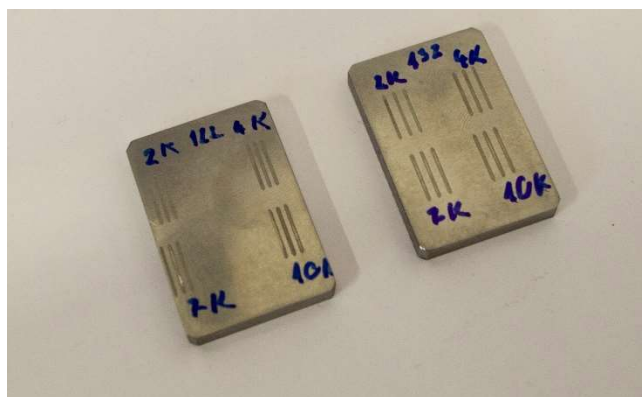
Obr. 5-1 Měření hloubky drážek

Tab. 5-2 Hmotnostní úbytek drážek

Počet cyklů	MRF-122EC	MRF-132DG	MRF-140CG	HM 32
-	μg	μg	μg	μg
2 000	123	37	80	78
4 000	169	66	132	77
7 000	160	164	164	140
10 000	254	256	206	125



Obr. 5-2 Hmotnostní úbytek drážek



Obr. 5-3 Destičky s vyrobenými drážkami (vlevo – MRF-122EC, vpravo – MRF-132DG)

6 DISKUZE

V práci bylo provedeno měření opotřebení na testovací destičce a vlivu MR kapalin na toto opotřebení. Tento základní úkol bakalářské práce byl splněn. Ačkoliv trendy při stanovení parametrů měření se zdály být uspokojivé, bylo nakonec měření zatíženo docela velikou odchylkou. Například odchylka hloubky drážky u kapaliny MRF-140CG při 7000 cyklech byla až 4 μm , což při průměrné hloubce 10,2 μm je značný rozptyl.

Z výsledků je vidět, že největšího opotřebení bylo dosaženo během prvních 2000 cyklů. Tento trend by dle mého názoru ještě více vynikl na kratším měřicím úseku. Při prvních cyklech je styková plocha pinu a destičky velmi malá (bodový kontakt), a tudíž tribologické parametry jsou značně odlišné oproti závěrečným cyklům testu, kde už styk pinu s drážkou je liniový, tudíž tlak pinu na podložku není tak velký. Tento jen je nejvíce znatelný běhen prvních cyklů, kdy olej a MR kapaliny vykazovaly dost podobné výsledky, které se u delších měření rozcházely.

Při vyhodnocení MR kapalin můžeme dle hloubkového kritéria stanovit jako celkově nejabrazivnější MR kapalinu MRF-122EC, jako nejméně abrazivní pak kapalina MRF-132DG. Největší celkový hmotnostní úbytek byl zaznamenán u kapaliny MRF-140CG, nejmenší zase u kapaliny MRF-132DG. Tento výsledek je ovlivněn nesrovnalostí u měření při 2000 a 4000 cyklech, kdy MRF-132DG vykazuje přibližně stejné opotřebení jako hydraulický olej HM 32.

Při vyhodnocení pouze nejdelšího testu, tj. 10000 cyklu, můžeme říci, že kapalina MRF-132DG vykazuje dokonce nejvyšší hodnoty abrazivity v obou kritériích. Také se ukazuje, že MRF-122EC vykazuje nejmenší poměr odebraného materiálu k hloubce drážky. Kapalina MRF-140CG vykazuje tento poměr nejvyšší.

To jsou však poměrně malé nuance. Dle trendů lze soudit, že abrazivita MR kapalina při takto vysokých koncentracích částic již nezávisí na množství rozptýleného železa.

Při porovnání MR kapalin se hydraulickým olejem HM 32 je vidět několik zajímavostí. Naměřená hloubka drážka při testu v oleji je téměř konstantní, bez ohledu na počet opakování, ačkoliv úběr materiálu se zvyšujícími se cykly mírně roste. Dochází tedy nejspíše k úběru po okrajích drážky. Lze hodnotit, že při opotřebení destičky po 10000 cyklech je zhruba dvoutřetinové než u testovaných MR kapalin. Vzhledem k tomu, že závislost opotřebení není lineárně úměrná počtu cyklů, tak opotřebení destičky po 10000 přibližně odpovídá opotřebení materiálu MR kapalinou po 2000. Z tohoto kritéria lze soudit, že tělo MR tlumiče by mělo mít čtvrtinovou životnost oproti klasickému.

K nepřesnosti částečně přispěla i metoda vyhodnocení. Optický profilometr nebyl s to načíst všechny body v profilu drážky, jak je si možné povšimnout na **Obr. 4-3** či na **Obr. 4-13**. Většinou se jednalo pouze o pár bodů v celém profilu, někdy, i přes opakované čistění drážky a měření, však profilometr nebyl schopen změřit i více než 10 % z celého tvaru drážky. Proto by bylo vhodné využít pro metodu hmotnostního úbytku přímě měření hmotnosti, třeba tak, jak to udává norma ASTM G75 (kap. 2.6). Pro toto měření však nejsou v laboratoři tribologie dostatečně přesné váhy. Navíc by to značně prodlužovalo proces měření a vyhodnocení, protože by se po každém měření musela destička vyčistit a proměřit. Nyní se vyhodnocení dělalo po každém bloku testů s jednou kapalinou.

7 ZÁVĚR

7.1 Dosažené výsledky

V této práci byl navržen testovací proces, jehož cílem bylo simulovat podmínky uvnitř tlumiče a testováním určit, jaké je abrazivní působení MR kapalin na materiál těla tlumiče. Bylo zjištěno, že míra opotřebení způsobená abrazivním působením měřených MR kapalin je přibližně stejná a to navzdory různé koncentraci rozptýlených částic. Olej HM 32 přitom vykazoval poloviční opotřebení a tím přibližně 4x větší životnost.

Také proběhlo seznámení s normou ASTM G75, která se zabývá abrazivními účinky, a na to navázaným Millerovým číslem jako činitelem abraze kapalin a SAR číslem jako míry odolnosti materiálu vůči abrazivnímu působení.

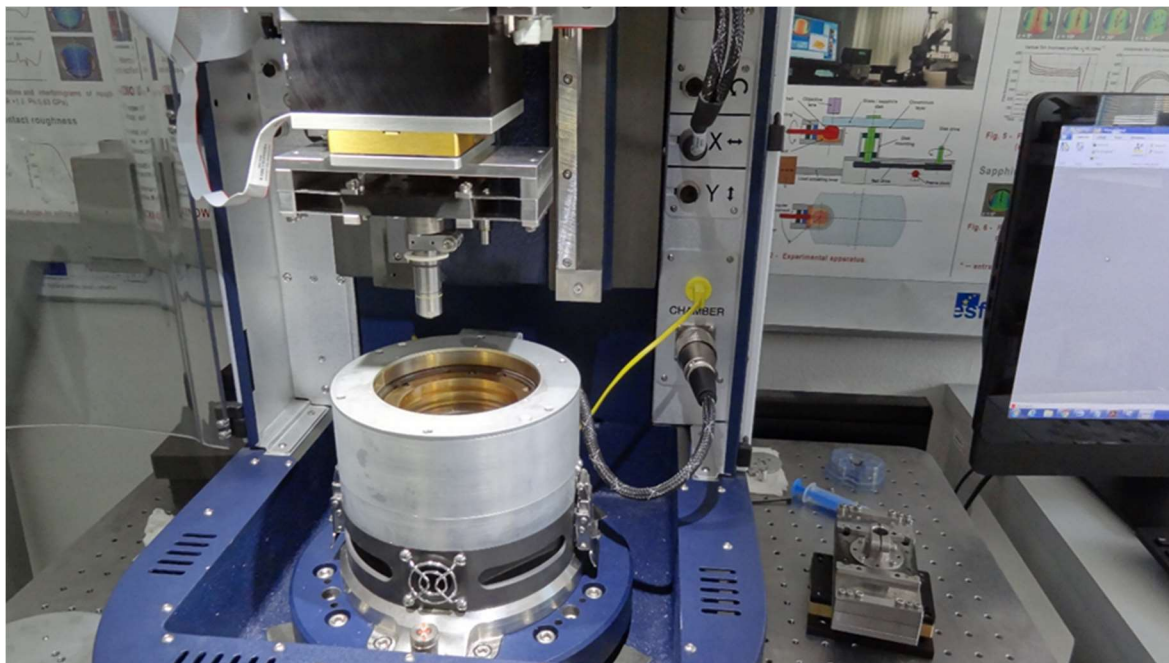
Všechny zadané úkoly jsou 100% splněné, ačkoliv normu ASTM G75 jsem k provedení experimentu nepotřeboval.

7.2 Další postup

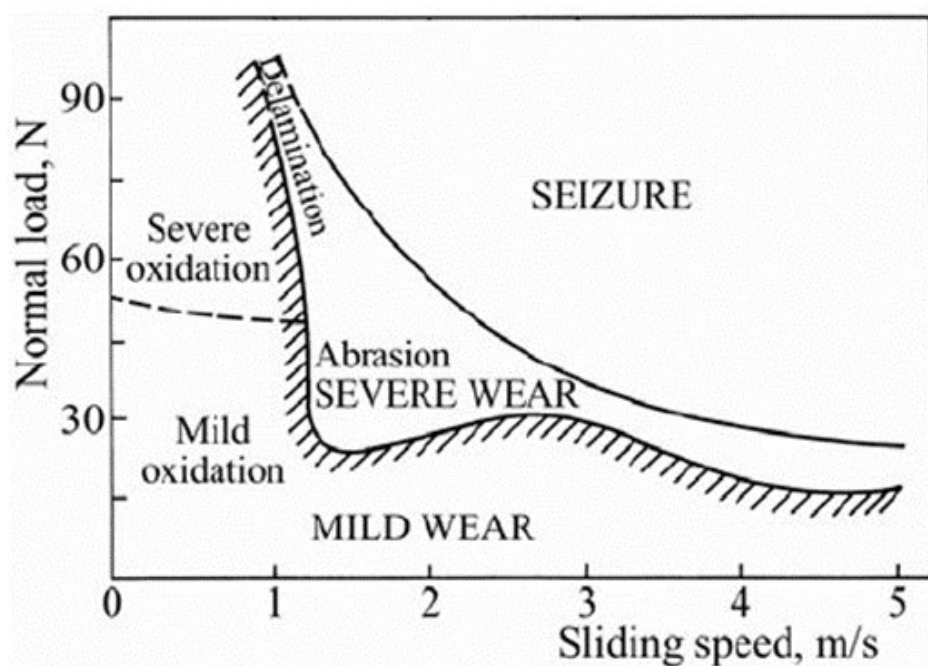
Je už na další dohodě, zda bude chtít Ústav konstruování použít nové vyhodnocení pro stávající kapaliny, ale vzhledem k tomu, že ústav vyvíjí svoje vlastní, je vhodné doladit technologii testu natolik, aby při měření těchto kapalin bylo možné správně určit míru opotřebení tlumiče při provozu s těmito kapalinami, či správně určit materiál pro tlumiče vlastní konstrukce.

Pro příští měření bych tak navrhnul několik změn. Pro snížení odchylky měření bych zvětšil počet opakovaných testů. Dále bych navrhnul vynechání měření při 2000 cyklech. Tam je z výše uvedených důvodů výsledkový rozptyl největší. Průměrný tlumič udělá přibližně 1000 pracovních cyklů za kilometr [25], proto bych pro potvrzení výsledků ještě provedl test s více cykly. Kupříkladu s 15000 cykly. Tímto by bylo možné lépe odhadnout trendy opotřebení při použití různých MR kapalin. Pro eliminaci bodového styku bych navrhnul použít pin zajišťující konformní kontakt. Tím by se zajistil rychlejší přechod z bodového zatížení na liniové a změny režimu mazání.

Dále by bylo vhodné změnit uchycení pinu tak, aby uchycení bylo zcela tuhé. Při současném měření je pin umístěn na siloměrech (pružných planžetách), které umožňují vychýlování pinu při testu. Také by bylo vhodné ověřit podmínky testů tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné podmínky pro opotřebení, nedocházelo k zadíraní, apod. Pro toto je nutné zmapovat wear map pro daný materiál a kapalinu, abychom věděli, ve které oblasti se při měření daný materiál nachází.



Obr. 7-1 Stávající uchycení pinu (pružné planžety)



Obr. 7-2 Wear map [26]

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] OHAREK, Lukáš. *Příprava magnetoreologických kapalin s vysokou sedimentační stabilitou*. B.m., 2018. VUT. Dostupné z: <https://bit.ly/2L180S3>
- [2] ŠIKA, Zbyněk. *Aktivní a poloaktivní snižování mechanického kmitání strojů*. B.m., 2004. ČVUT. Dostupné z: <https://bit.ly/2IG3XZI>
- [3] LAZAR, Jaroslav. *Magnetoreologický tlumič kmitání*. B.m., 2011. VUT. Dostupné z: <https://bit.ly/2UC8gX8>
- [4] VLČEK, Martin. *Využití regulovatelných tlumičů v automobilu Škoda Superb*. 2011. Dostupné z: <https://bit.ly/2vu96LM>
- [5] PROCHÁZKA, Juraj. Tekuté magnety zdokonalia autá aj roboty. *Techbox*. 2012 [vid. 27. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2UO9XB9>
- [6] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: SNTL, 1976.
- [7] ASTM INTERNATIONAL. ASTM G 75-07 Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). *American society for testing and materials*, , *ASTM International*. 2013, roč. volume:1, č. September 2009, s. 1–9.
- [8] JANOUSEK, Milan. *Návrh zařízení pro testování opotřebitelnosti materiálu*. B.m., 2015. ČVUT. Dostupné z: <https://bit.ly/2ZvPtRd>
- [9] FALEX TRIBOLOGY. *MILLER NUMBER SLURRY ABRASIVITY TESTER*. 2017 [vid. 24. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2GFixyd>
- [10] JOLLY, Mark R., Jonathan W. BENDER a J. David CARLSON. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1999, roč. 10, č. 1, s. 5–13. ISSN 1045-389X.
- [11] SOHN, Jung Woo, Seung Bok CHOI, Chul Hee LEE a Myeong Woo CHO. Wear Characteristics of Magnetorheological Fluid under Boundary Lubrication. *Advanced Materials Research*. 2009, roč. 79–82, s. 83–86. ISSN 1662-8985.
- [12] YANG, J.-J. a H. YAN. Research on the friction and wear properties of magnetorheological fluids. *Key Engineering Materials*. 2017, roč. 727, s. 17–21. ISSN 10139826.
- [13] LEE, Chul Hee, Deuk Won LEE, Jae Young CHOI, Seung Bok CHOI, Won Oh CHO a Hyuk Chae YUN. Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid. *Journal of Tribology*. 2011, roč. 133, č. 3, s. 031801. ISSN 07424787.
- [14] ZHANG, Peng, Kwang-Hee LEE a Chul-Hee LEE. Friction behavior of magnetorheological fluids with different material types and magnetic field strength. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2016, roč. 29, č. 1, s. 84–90. ISSN 1000-9345.
- [15] HU, Z D, H YAN, H Z QIU, P ZHANG a Q LIU. Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field. 2012, roč. 279, s. 48–52.

- [16] WONG, P L, W A BULLOUGH, C FENG a S LINGARD. Tribological performance of a magneto-rheological suspension. 2001, roč. 247, s. 33–40.
- [17] IYENGAR, Vardara J A N R, Alexander A ALEXANDRIDIS, Simon C TUNG a David S RULE. Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids © Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids. 2010, roč. 2004.
- [18] LORD CORPORATION. MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid. *MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid*. 2008 [vid. 19. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2ZH1DXl>
- [19] LORD CORPORATION. *MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid*. 2011 [vid. 19. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2J7CnnB>
- [20] LORD CORPORATION. *MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid*. 2008 [vid. 19. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2LmKRKj>
- [21] PARAMO. *Hydraulické oleje HM ZF*. 2008 [vid. 5. květen 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2w3iiXH>
- [22] BRUKER. *TRIBOLOGY AND MECHANICAL TESTING*. 2019 [vid. 24. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2yoTIA0>
- [23] VRÁNA, Jakub. *Hodnocení topografie povrchu strijních součástí pomocí optického profilometru*. B.m., 2017. VUT. Dostupné z: <https://bit.ly/2J1hE4O>
- [24] BRUKER. *ContourGT-X 3D Optical Profiler*. 2019 [vid. 27. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2XPhNw4>
- [25] VACULÍK, Martin. Jak se pozná opotřebení tlumičů: *Auto.cz*. 2013 [vid. 1. květen 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/301BmDi>
- [26] VENCL, Aleksandar, Ilija BOBIC a Alexandar RAC. Tribological Behaviour of Al-Based Mmcs and Their Application in Automotive Industry. *Tribology in Industry*. 2004, roč. 26, č. 3, s. 31–38.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

F	silové zatížení
μ	koeficient tření
M	hmotnostní úbytek
dM	rychlost úbytku materiálu

9.2 Zkratky v textu

MR kapalina	magnetoreologická kapalina
MN	Millerovo číslo
SAR	SAR číslo
COF	koeficient tření

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Abraze způsobená MR kapalinou.....	13
Obr. 2-1	Princip fungování magnetoreologického tlumiče [5]	15
Obr. 2-2	Rozměry testovací destičky pro Millerův test [7]	17
Obr. 2-3	Millerův test [8]	17
Obr. 2-4	Testovací stroj Falex [9].....	17
Obr. 2-5	Abraze při různých podmínkách [11].....	20
Obr. 2-6	Naměřený koeficient tření [11]	21
Obr. 2-7	Naměřené koeficienty tření bez mag. pole [12]	21
Obr. 2-8	Naměřené koeficienty tření v mag. poli [12].....	22
Obr. 2-9	Odběr materiálu (vlevo) a koeficient tření (vpravo) [13]	23
Obr. 2-10	Závislost koeficientů tření pro různé materiály a mag. pole [14]	24
Obr. 2-11	Koeficient tření pro různé MR kapaliny a mag.pole [14].....	25
Obr. 2-12	Průměrná velikost koeficientu tření na proudu vytvářejícím mag. pole (1,5 A = 0,14 T, 2 A = 0,17 T, 2,5 A = 0,21 T) [15]	26
Obr. 2-13	Velikost koeficientu tření na proudu vytvářejícím mag. pole u MRF4 (1 A = 0,8 T, 1,5 A = 0,14 T, 2 A = 0,17 T)	27
Obr. 2-14	Testovací aparatura [16].....	27
Obr. 2-15	Závislost úbytku hmotnosti na koncentraci částic [16]	28
Obr. 2-16	Závislost procentuální změny struktury povrchu na koncentraci částic [16]	28
Obr. 2-17	Závislost koeficientu tření na koncentraci částic [16]	28
Obr. 2-18	Velikost opotřebení materiálů	29
Obr. 4-1	Tribometr Bruker UMT Tribolab [22].....	33
Obr. 4-2	Profilometr Bruker ContourGT-X [24]	35
Obr. 4-3	Profil drážky (nad čarou vytlačený materiál)	35
Obr. 4-4	Úvodní experiment.....	36
Obr. 4-5	Drážky vytvořené při zátěži 80 N po 4000 cyklech	36
Obr. 4-6	Drsnost povrchu po vyhlazení.....	37
Obr. 4-7	Experiment s vyhlazenou deskou	37
Obr. 4-8	Porovnání opotřebení pro HM 32 a MRF-132DG při 80 N a 120 N	38

Obr. 4-9	Porovnání opotřebení pro HM 32 a MRF-132DG při 80 N a 120 N.....	38
Obr. 4-10	Měřicí sestava (test v oleji HM 32)	39
Obr. 4-11	Profil drážky z profilometru.....	40
Obr. 4-12	Podélný profil drážky (červeně – krajní oblastní, modrá - místa odečtu hodnot)	40
Obr. 4-13	Profil drážky (červená čára: nulová hodnota, červená oblast: oblast výpočtu nulové hodnoty, zelená oblast: oblast určení hloubky drážky).....	41
Obr. 4-14	Příčný profil drážky (modře – vytlačený materiál, černě - odebraný materiál, plošný odběr – černá minus modrá plocha).....	41
Obr. 5-1	Měření hloubky drážek	42
Obr. 5-2	Hmotnostní úbytek drážek	43
Obr. 5-3	Destičky s vyrobenými drážkami (vlevo – MRF-122EC, vpravo – MRF-132DG)	43
Obr. 7-1	Stávající uchycení pinu (pružné planžety)	47
Obr. 7-2	Wear map [26]	47

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Velikost koeficientu tření v závislosti na použité MR kapalině.....	19
Tab. 2-2	Podmínky pro test [13].....	22
Tab. 2-3	Složení MR kapalin [15]	25
Tab. 2-4	Wear scar diameter a koeficient tření [15]	26
Tab. 4-1	Vlastnosti testovaných MR kapalin [18–20]	32
Tab. 4-2	Vlastnosti oleje Paramo HM 32 [21]	33
Tab. 4-3	Vlastnosti pro přímočarý posuv [22].....	34
Tab. 4-4	Vlastnosti pro vratný cyklus [22]	34
Tab. 5-1	Průměrná hloubka drážek.....	42
Tab. 5-2	Hmotnostní úbytek drážek.....	43

12 SEZNAM PŘÍLOH

2019_BP_Zacek_Jiri_182683_priloha

